



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**  
**INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONEXIÓN**  
**HVDC Y SU CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA DE LA**  
**CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.**

**Autor:**

**VÍCTOR BERMEJO HERNÁNDEZ**

**Director:**

**Dr. EMILIO JOSÉ BUENO PEÑA (UAH)**

**Tutor:**

**Dr. ANTONIO LÁZARO BLANCO**

**Leganés, 2011**



# **Introducción a los sistemas HVDC y su contribución a la mejora de la calidad de la energía eléctrica.**

Autor: Víctor Bermejo Hernández

Director: Emilio José Bueno Peña (UAH)

## **EL TRIBUNAL**

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

## **Agradecimientos**

A mis padres, gracias a su apoyo y cariño esto ha sido posible.

A Emilio José Bueno y Antonio Lázaro por darme esta oportunidad.

## **Resumen**

Los sistemas HVDC pueden ofrecer mejoras técnicas, medioambientales y, en casos de líneas de larga distancia, económicas, respecto a los sistemas convencionales de transmisión en HVAC.

Existen varias topologías para la implementación de estos sistemas. Las topologías dominantes actualmente son LCC, VSC y CSC, cada una con unas características distintas tanto en su control como en sus componentes y su modo de operación. La alta capacidad de control sobre las variables de los sistemas eléctricos que otorgan los sistemas HVDC hace sea muy extendida su instalación en los sistemas de transporte que requieren condiciones especiales.

Los sistemas HVDC ayudan a mejorar la calidad de la electricidad y a reducir los apagones a causa de varios tipos de perturbaciones, en especial los apagones causados por las faltas en cascada, y por tanto aumentan la estabilidad de la red eléctrica. Por ello son una opción económicamente viable para conexiones en la que se exigen altas capacidades técnicas que no poseen los sistemas HVAC como son las interconexiones entre redes asíncronas, la descongestión en zonas superpobladas, el transporte de electricidad a muy largas distancias o la generación de energía eléctrica en lugares muy alejados de las zonas de consumo y también en estaciones offshore en las que su instalación es muy usada.

**Palabras clave:** HVDC, componentes, estabilidad, calidad eléctrica.

## **Abstract**

The HVDC systems can offer technical, environmental improvements, and in cases of high voltage lines, economics improvements, respect to the conventional transmission systems in HVAC.

There are several topologies for the implementation of these systems. Now the dominant topologies are LCC, VSC and CSC, each with different characteristics as in control as in its components and their mode of operation. The high capacity of control on electrical systems variables that the HVDC systems provide, makes that his installation is very widespread in transport systems that require special conditions.

The HVDC systems help to improve energy quality and reduce the blackouts caused by several types of disturbances, especially blackouts caused by faults in cascade, and therefore increase the stability of the grid. Therefore the HVDC systems are an economically viable option for connections which require high technical skills that don't have the HVAC systems such as asynchronous interconnections, supply to congested areas, the transport of electrical energy at very large distances or the generation of power away from the consumption areas and offshore stations where the HVDC systems is usually used.

**Keywords:** HVDC, components, stability, energy quality.

# Índice

Portada .....	i
Agradecimientos.....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de figuras .....	x
Capítulo 1: Objetivos e Introducción.....	1
1.1 – Objetivos.....	1
1.2 - Alcance del Proyecto.....	1
1.3 - Comparación de sistemas de transmisión de energía eléctrica en HVAC y HVDC.....	2
1.3.1 – Introducción.....	2
1.3.2 -Sistema de transmisión HVDC.....	2
1.3.2.1 -Tipos de conexión.....	3
1.3.2.2 -Tipos de configuraciones de sistemas HVDC.....	4
1.3.3 -Aspectos técnicos.....	4
1.3.4 -Aspectos económicos.....	6
1.3.5 -Aspectos medioambientales.....	7
1.3.6 -Proyectos emblemáticos de HVDC.....	8
1.3.7 –Conclusión.....	8
Capítulo 2: Estudio comparativo de las topologías utilizadas en HVDC .....	9
2.1-Introducción.....	9
2.2-Topología basada en VSC (voltage source converter) .....	9
2.2.1-Dispositivos necesarios.....	10
2.2.2-Rango máximo de trabajo .....	12
2.3-Topología LCC (Line Commutated Converter) .....	12
2.3.1-Dispositivos necesarios.....	13
2.3.2-Rango máximo de trabajo. ....	15

2.4-Topología CSC (Current source converters) .....	15
2.4.1-Dispositivos necesarios.....	16
2.4.2-Rango máximo de trabajo.....	18
2.5-Comparación de las características de cada topología.....	18
Capítulo 3: Simulaciones de topologías en HVDC.....	21
3.1- Introducción.....	21
3.2- Simulación de un sistema HVDC-VSC.....	21
3.2.1-Componentes del sistema. ....	22
3.2.1.1.- Filtros en los sistemas VSC-HVDC.....	22
3.2.1.1.1- Inductancias. ....	22
3.2.1.1.2- Filtros de AC.....	23
3.2.1.1.3- Filtros en DC.....	24
3.2.2- Control.....	25
3.2.2.1- PLL (phase locked loop).....	26
3.2.2.2- Lazo exterior de potencia activa, reactiva y de tensión.....	26
3.2.2.3- Lazo de corriente interno.....	29
3.2.2.4- Control del equilibrio de tensión de DC.....	30
3.2.3- Comportamiento dinámico del sistema VSC-HVDC.....	30
3.2.4- Arranque .....	31
3.2.5- Cambio de referencia de potencia activa, reactiva y de tensión $U_{dc}$ ..	31
3.2.6- Recuperación ante perturbaciones en el sistema de AC. ....	32
3.3- Simulación de un sistema LCC.....	35
3.3.1- Componentes del sistema.....	35
3.3.2- Control .....	37
3.3.3- Modos de operación en estado estacionario.....	38
3.3.4- Comportamiento dinámico del sistema HVDC-LCC .....	38
3.3.4.1- Arranque .....	39
3.3.4.2- Parada .....	41
3.3.4.3.- Cambio de referencia de tensión y corriente.....	43



3.3.4.4- Falta en el sistema DC.....	45
3.3.4.5- Falta en el sistema de AC .....	46
Capítulo 4: El transformador de continua.....	48
4.1- Introducción.....	48
4.2- Convertidor DC-DC unidireccional .....	49
4.3-Convertidor bidireccional con cambio de tensión. ....	52
4.4- Convertidor bidireccional con cambio de corriente .....	55
4.5- Conexión de TAPs .....	56
4.6- Conclusión .....	58
Capítulo 5: Repercusión de los sistemas HVDC en la mejora de la calidad eléctrica.....	59
5.1- Introducción.....	59
5.2- Estabilidad en la red eléctrica.....	59
5.2.1- Inestabilidad angular.....	60
5.2.2- Inestabilidad de frecuencia.....	60
5.2.3- Inestabilidad de tensión.....	60
5.3 -Mejoras de la estabilidad en la red eléctrica con los sistemas HVDC.....	62
5.3.1- Conexión de HVDC con líneas HVAC en paralelo .....	64
5.3.2- Arranque sin energía externa .....	64
5.4- Ejemplos de comportamiento ante perturbaciones de los sistemas HVDC.....	64
5.5- Conclusión.....	65
Capítulo 6: Presupuesto.....	66
Capítulo 7: Conclusiones.....	67
Referencias .....	68

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Esquema unifilar simplificado de un sistema HVDC .....	2
Figura 1.2 - Esquema unifilar de conexión HVDC monopolar .....	3
Figura 1.3 - Esquema unifilar simplificado de conexión HVDC bipolar .....	3
Figura 1.4 - esquema unifilar de una conexión HVDC homopolar .....	4
Figura 1.5 - Relación entre potencia transmitida y distancia en líneas HVAC y HVDC. ....	5
Figura 1.6 - Pérdidas en líneas HVAC y HVDC en función de la distancia .....	5
Figura 1.7- Comparación del coste de los sistemas HVDC y HVAC para la misma potencia. ....	7
Figura 2.1- Esquema unifilar de un sistema HVDC-VSC .....	9
Figura 2.2- Convertidor VSC de dos niveles. ....	10
Figura 2.3- Convertidor VSC de 3 niveles. ....	10
Figura 2.4- Rama de un rectificador monofásico con IGBTs colocados en serie. ....	11
Figura 2.5- Esquema unifilar de un sistema LCC-HVDC. ....	13
Figura 2.6.- Rectificador e inversor de 6 pulsos con tiristores de topología LCC . ....	13
Figura 2.7 - Esquema eléctrico de un convertidor de doce pulsos y sus transformadores. ....	14
Figura 2.8 - Esquema unifilar de un sistema HVDC-CSC .....	15
Figura 2.9 - Convertidor CSC basado en IGBTs con diodo en serie. ....	16
Figura 2.10 - Conexión en serie de dos convertidores CSC .....	17
Figura 2.11 - Esquema unifilar del sistema HVDC –VSC .....	18
Figura 2.12 - Esquema unifilar del sistema LCC .....	19
Figura 2.13 - Rangos de potencia de cada topología .....	20
Figura 3.1 - Esquema del sistema de transmisión HVDC-VSC ( $\pm 100\text{KV}$ ; 200MW).....	21
Figura 3.2 - Componentes de la estación rectificadora .....	22
Figura 3.3 - Tensión antes de las inductancias en serie .....	23
Figura 3.4 - Tensión después de las inductancias en serie. ....	23
Figura 3.5 - Esquema simplificado de control en VSC .....	25
Figura 3.6 - Esquema interno del lazo exterior de potencia activa, reactiva y de tensión. ....	27
Figura 3.7 - Esquema de control simplificado de los bloques de control de potencia reactiva y calculo de la corriente de referencia. ....	27

Figura 3.8 - Esquema de control simplificado de los bloques de control de potencia activa y calculo de la corriente de referencia. ....	28
Figura 3.9 - Esquema de control simplificado del bloque de control de Udc. ....	28
Figura 3.10 - Esquema simplificado del lazo interno de corriente ....	29
Figura 3.11 - Esquema de control del lazo interno de corriente ....	30
Figura 3.12 - Respuesta dinámica del sistema VSC ante un arranque ....	31
Figura 3.13 - Respuesta dinámica ante escalón de referencia de potencia activa y reactiva ....	31
Figura 3.14 - Respuesta dinámica ante un escalón de referencia de Udc ....	32
Figura 3.15 - Respuesta dinámica ante un escalón de tensión en AC en la estación rectificadora ....	33
Figura 3.16 - Respuesta dinámica ante cortocircuito en estación inversora. ....	34
Figura 3.17 - Esquema del sistema HVDC-CSC con tiristores (1000MW, +-500KV) implementado en Matlab/Simulink ....	35
Figura 3.18 - Esquema de componentes del bloque rectificador e inversor ....	36
Figura 3.19 - Esquema de componentes de filtros de AC ....	36
Figura 3.20 - Esquema de control del sistema. ....	37
Figura 3.21 - Tensión, corriente y ángulo $\alpha$ en el rectificador en el arranque del sistema ....	39
Figura 3.22 - Tensión, corriente, ángulo $\alpha$ y ángulo gamma en el inversor en el arranque del sistema ....	40
Figura 3.23 - Tensión, corriente y ángulo $\alpha$ en el rectificador en la parada del sistema ....	41
Figura 3.24 - Tensión, corriente, ángulo $\alpha$ y ángulo gamma en el inversor en la parada del sistema ....	42
Figura 3.25 - Tensión, corriente y ángulo $\alpha$ en el rectificador en el cambio de referencia de corriente y de tensión ....	43
Figura 3.26 - Tensión, corriente, ángulo $\alpha$ y ángulo gamma en el inversor en el cambio de referencia de corriente y de tensión ....	44
Figura 3.27 - Tensión, corriente y ángulo $\alpha$ en el rectificador durante una falta en el sistema DC.....	45
Figura 3.28 - Tensión, corriente, ángulo $\alpha$ en el inversor y corriente de falta durante una falta en el sistema DC ....	46
Figura 3.29 - Tensión, corriente y ángulo $\alpha$ en el rectificador durante una falta en el sistema AC.....	47

Figura 3.30 - Tensión, corriente, ángulo $\alpha$ y ángulo gamma en el inversor durante una falta en el sistema de AC .....	47
Figura 4.1 - Topología de convertidor de conmutación de condensadores .....	49
Figura 4.2 - Convertidor DC-DC unidireccional .....	49
Figura 4.3 - Tensiones y corrientes en el convertidor unidireccional .....	51
Figura 4.4 - Sistema de control del convertidor unidireccional. ....	51
Figura 4.5 - Convertidor bidireccional con cambio de tensión. ....	52
Figura 4.6 - Control aplicado a convertidor bidireccional .....	53
Figura 4.7 - Tensiones y corrientes en el convertidor bidireccional como reductor de tensión .	54
Figura 4.8 - Variación de $dl_2/dt$ , $V_c$ y $\alpha_B$ en función de $L_2$ . ....	55
Figura 4.9 - Convertidor bidireccional con cambio de corriente .....	56
Figura 4.10 – Esquema simplificado de la conexión de un TAP. ....	56
Figura 4.11- Esquema eléctrico de un TAP unidireccional .....	57
Figura 4.12- TAP bidireccional con convertidor DC/AC .....	57
Figura 4.13- TAP bidireccional con convertidor DC/AC .....	57
Figura 5.1 - Esquema de tipos de estabilidad en sistemas eléctricos .....	60
Figura 5.2 - Flujo de potencia de dos sistemas HVAC y HVDC sin conexión y con conexión respectivamente. ....	61
Figura 5.3 - Conexión de línea HVAC y HVDC en paralelo y potencias de transmisión. ....	62
Figura 5.4 - Curva PV de la conexión HVAC y HVDC en paralelo. ....	63
Figura 5.5 - Conexiones HVDC en el norte de Europa. ....	64
Figura 5.6 - conexión HVDC del Pacífico .....	64
Figura 6.1- Presupuesto .....	66



# Capítulo 1

## Objetivos e Introducción

### 1.1 – Objetivos

El objetivo del proyecto es realizar un estudio de los sistemas HVDC en la actualidad en muchos de sus aspectos, como son sus ventajas y desventajas respecto a los sistemas HVAC, las características y componentes de las distintas topologías usadas en HVDC, su control y respuesta dinámica y las posibilidades de influir en la calidad eléctrica de la red.

### 1.2 – Alcance del proyecto

- **Capítulo 1**

En este capítulo se describen los objetivos del proyecto y se describen las posibles conexiones de los sistemas de transmisión HVDC y se realiza una comparación entre estos y los sistemas de transmisión de alta tensión en corriente alterna, en los aspectos técnicos, medioambientales y económicos.

- **Capítulo 2**

En este capítulo se describen los componentes necesarios para las tres posibles topologías de un sistema HVDC y se comparan las características técnicas y los componentes de las utilizadas actualmente.

- **Capítulo 3**

Se realizan simulaciones de un sistema HVDC-VSC y un sistema HVDC-LCC en Matlab/Simulink, describiendo el funcionamiento de su control y comprobando su respuesta dinámica ante las posibles perturbaciones.

- **Capítulo 4**

En este capítulo se estudia el funcionamiento de los transformadores de continua, unidireccionales y bidireccionales, con un rango de actuación de MW y altas ganancias de tensión.

- **Capítulo 5**

En este capítulo se describe como los sistemas HVDC pueden aportar mayor calidad de la energía eléctrica mejorando la estabilidad a la red eléctrica y se muestran ejemplos prácticos de situaciones en las que los sistemas HVDC han aportado dicha estabilidad.

- **Capítulo 6**

En este capítulo se presenta el presupuesto de la realización del proyecto.

- **Capítulo 7**

Se exponen las conclusiones genéricas del estudio de los sistemas HVDC y su repercusión en la calidad eléctrica.

## 1.3–Comparación de sistemas de transmisión de energía eléctrica en HVAC y HVDC

### 1.3.1- Introducción

Los primeros generadores eléctricos y las primeras transmisiones de energía eléctrica se produjeron en corriente continua, así como la primera planta de generación eléctrica en Nueva York en el año 1882. Poco a poco se fueron desarrollando con más éxito los sistemas de corriente alterna como los transformadores, los circuitos polifásicos y el motor de inducción debido a su alta disponibilidad. El motor de inducción es el más utilizado en la industria y solo trabaja con corriente alterna. Usar transformadores es la manera más simple y fácil de cambiar la tensión de un sistema eléctrico, lo cual es fundamental para el transporte, distribución y uso de la energía eléctrica, tanto industrial como doméstica. Aún así en el transporte de energía eléctrica a larga distancia, los sistemas HVDC presentan mejores características técnicas, económicas y medioambientales que los HVAC.

### 1.3.2 - Sistema de transmisión HVDC

Los sistemas de transmisión en HVDC se basan en un rectificador conectado a un sistema de corriente alterna para la conversión AC/DC y al final de la línea una conversión DC/AC mediante un inversor. Tanto el rectificador como el inversor pueden estar formados por tiristores, por transistores IGBT, etc. Los transformadores antes del rectificador y después del inversor se colocan por la diferencia de tensión entre el sistema de AC y DC. Es necesario colocar filtros para adecuar la forma de onda a la salida en los convertidores y, en caso de usar tiristores, suministrar potencia reactiva.

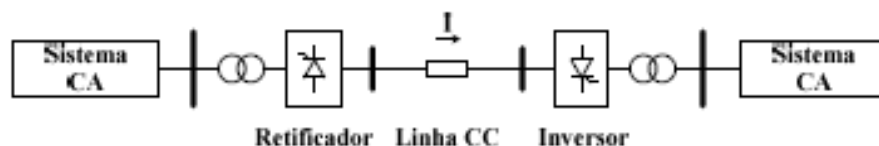


Figura 1.1 - Esquema unifilar simplificado de un sistema HVDC

### 1.3.2.1 -Tipos de conexión

Los sistemas HVDC permiten varios tipos de conexión con diferentes características. Una posibilidad es la conexión monopolar. Consiste en un solo cable de alta tensión por el que se transmite energía eléctrica, está conectado a tierra en las estaciones de conversión. Este tipo de conexión se utiliza cuando supone un ahorro económico muy grande por las grandes distancias. También se usa para cables submarinos, y en caso de que en un sistema bipolar no sea posible utilizar uno de los conductores. En algunas ocasiones, por razones medioambientales o para evitar pérdidas importantes, se coloca un conductor de retorno.

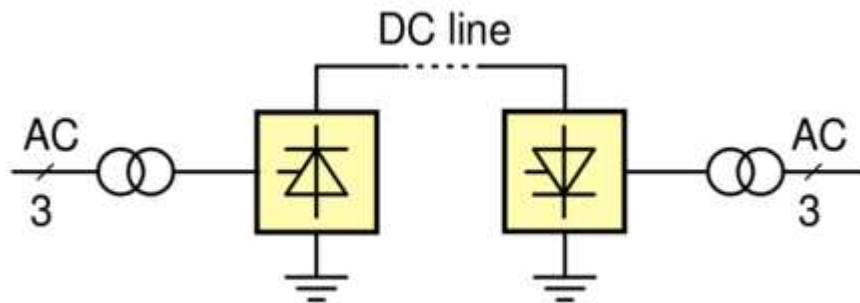


Figura 1.2 - Esquema unifilar de conexión HVDC monopolar

Otro tipo de conexión es la bipolar donde dos conductores transportan la energía, uno a tensión positiva y otro a negativa. Este sistema tiene más fiabilidad que el monopolar puesto que en caso de fallo de una línea, la otra puede transportar más del 50% de la potencia que llevaban las dos. Las líneas pueden tener un cable de retorno o pueden conectarse a tierra. En el primer caso el cable de retorno funcionaría de forma similar al neutro en un sistema trifásico.

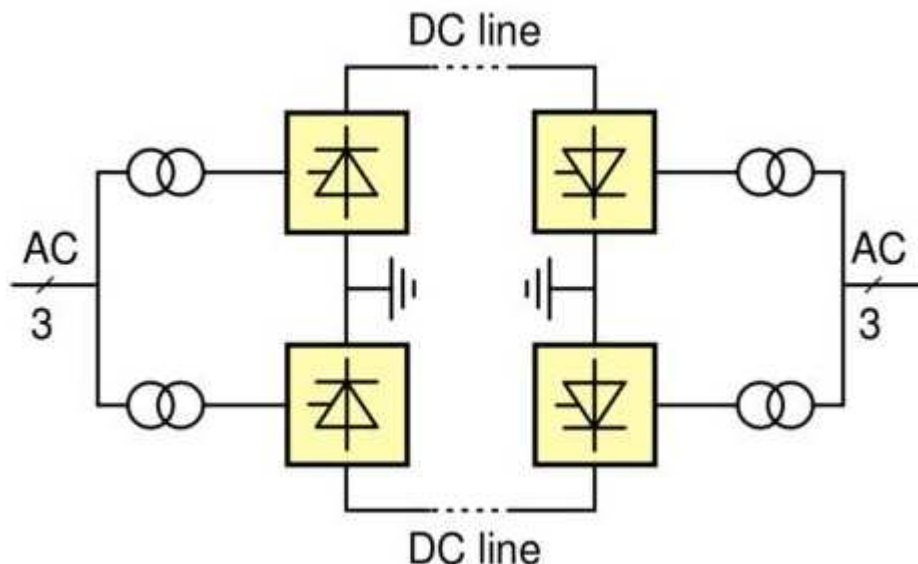


Figura 1.3 - Esquema unifilar simplificado de conexión HVDC bipolar



El tercer tipo de conexión de un sistema HVDC es la conexión homopolar. En esta conexión se utilizan dos conductores con la misma polaridad y se utiliza un conductor metálico de retorno por el que circulará el doble de la corriente nominal en una de las líneas.

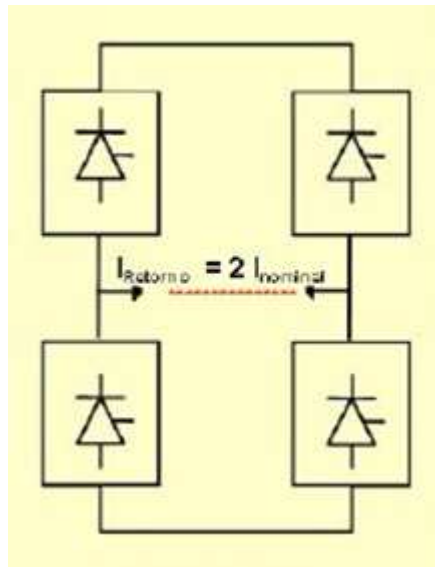


Figura 1.4 - Esquema unifilar de una conexión HVDC homopolar

### 1.3.2.2 - Tipos de configuraciones de sistemas HVDC

- La configuración back-to-back se emplea para la conexión de dos sistemas que no están en sincronismo y son muy cercanos por lo tanto no es necesario una línea que conecte los convertidores.

- La configuración punto a punto es la más utilizada, puesto que se usa cuando no es posible una conexión AC entre dos subestaciones o para casos en los que se utilicen cables submarinos, parques eólicos offshore, plantas petrolíferas, etc. Una de las dos subestaciones funciona como rectificador y la otra como inversor.

- También es posible conectar varias subestaciones que funcionan en HVDC, en la configuración multiterminal, ya sea en paralelo, en serie o una combinación de ambas.

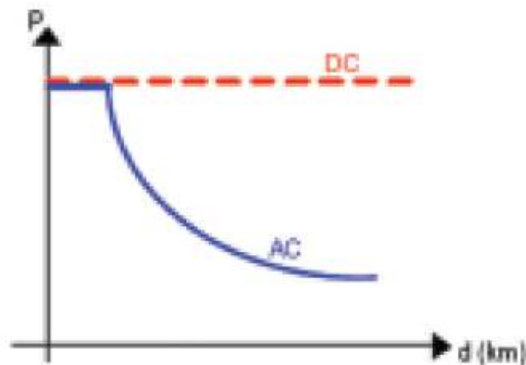
- La configuración unitaria consiste en que el rectificador está conectado a la salida de un generador, normalmente generadores eólicos o hidráulicos, lo que permite aprovechar la energía generada independientemente de su frecuencia.

### 1.3.3 - Aspectos técnicos

Respecto a la capacidad de transmisión, las líneas de HVAC tienen una limitación de longitud debido a sus efectos inductivos. Estos efectos provocan una diferencia de fase entre el principio y el final de la línea, por tanto para que sea posible la transmisión de potencia activa la

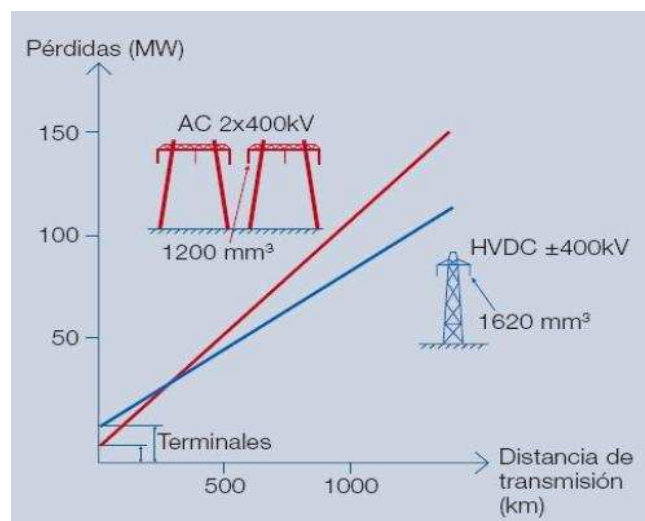
línea exige consumo de potencia reactiva lo cual puede llevar a la inestabilidad del sistema, en algunos casos son necesarios métodos de compensación de reactiva. Este consumo aumentará con su longitud hasta llegar a un punto en que la línea solo transmita potencia reactiva y no potencia activa.

Las líneas de HVDC no producen efectos inductivos por lo tanto no hay diferencia de fase entre sus dos extremos consiguiendo que toda la potencia transmitida sea potencia activa aprovechando mucho más la capacidad de transmisión y una gran estabilidad. Esto hace que no tengan limitación respecto a su longitud.



**Figura 1.5 - Relación entre potencia transmitida y distancia en líneas HVAC y HVDC.**

Las pérdidas en el sistema son otro punto a tener en cuenta, tanto las producidas en las líneas como en los convertidores y transformadores. Aunque las pérdidas en los convertidores, entre 2% y 5% en el caso de VSC, son mucho mayores que en los transformadores. En las líneas HVDC se producen menores pérdidas que en las HVAC en relación a su longitud. Por lo tanto habrá una determinada distancia en las que sean iguales y a partir de esa distancia los sistemas HVDC tendrán menores pérdidas que los HVAC. Dicha distancia dependerá de la potencia instalada y los tipos de cable usados en cada caso.



**Figura 1.6 - Pérdidas en líneas HVAC y HVDC en función de la distancia**

Otras ventajas de los sistemas HVDC son:

- Son muy apropiados para los cables submarinos ya que no tienen la limitación de distancia de los HVAC debido a la alta capacidad dieléctrica de los cables. Por ello los HVDC son muy usados en sistemas independientes.
- Son muy útiles en caso de conexión de dos sistemas asíncronos ya que sería muy difícil o imposible conectarlos en corriente alterna por razones de estabilidad. Esto resulta muy útil en caso en que la generación se produzca a frecuencia variable, como es el caso de aerogeneradores.
- No transportan potencia reactiva por lo tanto es muy fácil controlar totalmente la potencia activa por las líneas.
- No contribuyen a la corriente de cortocircuito del sistema de AC al que estén conectados. En caso de producirse un cortocircuito en las líneas HVDC su corriente es menor que en las HVAC.
- Contribuyen a la estabilización del sistema eléctrico. En grandes sistemas eléctricos y bajo condiciones transitorias pueden producirse inestabilidades. Los sistemas HVDC facilitan el control de estas situaciones por su rápido control de potencia.

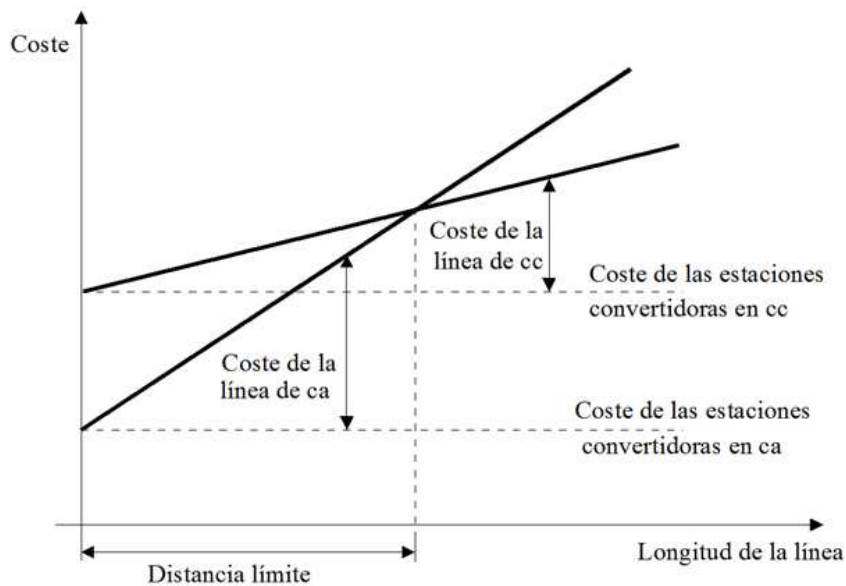
Los sistemas de transmisión HVDC también tienen algunas desventajas:

- La generación de armónicos en los convertidores, por lo cual se instalan filtros con el fin de adecuar la tensión y la corriente a la salida de estos.
- No es posible utilizar transformadores para cambiar el nivel de tensión.
- En algunos casos es necesario un generador de reactiva.
- Requiere de controles complejos.

Como se puede ver las ventajas técnicas hacen de los sistemas HVDC buena alternativa en los casos en los que los sistemas HVAC no son viables técnicamente.

### **1.3.4 - Aspectos económicos**

Cuando es posible implementar los dos sistemas las razones determinantes suelen ser las económicas. Para analizar los costes de ambos sistemas de transmisión de potencia se tiene en cuenta toda la instalación, desde las estaciones de convertidores hasta las líneas, su construcción y las pérdidas. En la figura se muestra como los costes fijos de las estaciones HVDC son más grandes que las HVAC, ya que las estaciones de convertidores son más caras que los transformadores. Por otro lado los costes de las líneas HVDC son menores ya que para la misma potencia exigen menor número de conductores, tienen menos pérdidas y no son necesarias grandes torres para sujetar los esfuerzos mecánicos de los cables de la instalación, como sucede en el caso de los sistemas HVAC. Por lo tanto, para muy largas distancias las líneas HVDC son mejores en el aspecto económico.



**Figura 1.7 - Comparación del coste de los sistemas HVDC y HVAC para la misma potencia.**

La distancia límite suele estar entre 500 y 1000 km para líneas aéreas aunque en el caso de las líneas submarinas está entre 20 y 50 Km.

### 1.3.5 - Aspectos medioambientales

Otro criterio importante a tener en cuenta en la implantación de sistemas de transmisión de potencia es el medioambiental. Hay que evaluar el impacto visual, la magnitud de los efectos de los campos magnéticos y eléctricos, el efecto corona, que puede producir interferencias en radiofrecuencias, ruidos y generación de ozono. Los sistemas HVDC tienen las siguientes características medioambientales:

Los corredores de paso, terreno ocupado por las líneas, necesarios son muy importantes para el impacto visual. Al utilizar menor número de conductores emplean menores corredores que los sistemas HVAC.

Los campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas no son mayores que las que generan la tierra. Aunque en ocasiones, en instalaciones monopolares sin retorno metálico estos campos pueden influir en tuberías en conductos metálicos cercanos, incluso influir en lecturas de brújulas, en esos casos es necesario un conductor de retorno.

Los sistemas HVDC produce menor efecto corona que las líneas de HVAC luego genera menor ozono y no se emplearan tantas medidas como en HVAC para reducir dicho efecto. La concentración natural de ozono en el aire limpio es de 50 ppb, en ciudades puede alcanzar los 150 ppb. La sobrecarga del sistema HVDC produce solo un 10 ppb por encima de la concentración natural.

Pueden aparecer campos electromagnéticos que interfieran en las telecomunicaciones debido a los armónicos producidos por las operaciones en los convertidores. Estos efectos pueden ser reducidos con el uso adecuado de filtros.

Todas estas razones indican que la tecnología HVDC respeta más el medio ambiente que la HVAC.

### **1.3.6 - Proyectos emblemáticos de HVDC**

En 1954 se construyó la primera línea comercial de DC de 20 MW. Funcionaba a 100 Kv y hasta 200 A. 50 años después había instalada en el mundo una potencia de 70000 MW. Los proyectos más grandes con esta tecnología son:

- Mayor enlace construido (Itapu, Brasil): 6300 MW, 600Kv. Año 1985
- El mayor convertidor (Gorges-Changzhou, China): 1500 MW 500KV. Año 2002.
- El cable subterráneo de mayor longitud con tecnología VSC (Murraylink, Australia). Año 2002.
- El mayor sistema VSC (Cross Sound, USA): 330 MW. Año 2002.
- Primera carga en alta mar (plataforma petrolífera Troll, Noruega): 2x42 MW. Año 2002
- El cable submarino tendido a mayor profundidad (Italia-Grecia): 1000m. Año 2001

En España se ha planificado desde hace años una línea HVDC para conectar la península con Mallorca y Mallorca-Ibiza aunque para esta segunda también sería viable una línea HVAC, no siendo así en el primer caso en el que la distancia limita la línea a una sola posibilidad.

### **1.3.7 - Conclusión**

Los sistemas de transmisión de potencia HVDC son más favorables que los HVAC tanto en el aspecto técnico como en el medioambiental ya que no tienen problemas de estabilidad, por su ausencia de frecuencia, ni limitación de distancia y tienen menores efectos negativos en la naturaleza y en los humanos. A pesar de esto los mayores costes en las estaciones y los menores en las líneas del sistema HVDC hacen que solo sean viables económicamente para líneas muy largas y en condiciones especiales como líneas submarinas, zonas congestionadas donde no es posible la generación, o conexión de sistemas asíncronos.

# Capítulo 2

## Estudio comparativo de las topologías de HVDC

### 2.1.-Introducción

Para implementar las tecnologías de HVDC es posible utilizar varias topologías diferentes. Las tres topologías dominantes en la actualidad son los sistemas basados en VSC (voltage source converter), basados en CSC (current source converter) y los sistemas LCC (line commutated converter) con tiristores. A continuación se expondrá los componentes de cada uno de estos sistemas y se compararan en varios aspectos.

### 2.2.-Topología basada en VSC (voltage source converter)

Esta topología esta basada en la modulación del convertidor como fuente de tensión, ya que consiste en la operación de IGBT con modulación PWM lo cual hace posible controlar el nivel de tensión y su frecuencia lo que le da a esta topología multitud de aplicaciones. Una característica importante es el gran control de la potencia reactiva que se transmite, ya que esto es imposible en otras configuraciones.

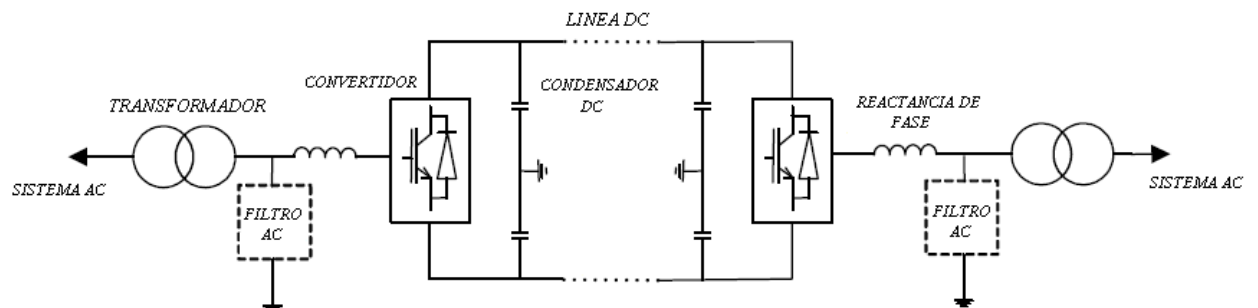


Figura 2.1- Esquema unifilar de un sistema HVDC-VSC

### 2.2.1-Dispositivos necesarios

Los sistemas VSC están formados por varios componentes que se describirán a continuación:

#### Convertidores

Los convertidores utilizados en la topología VSC están formados por IGBTs con un diodo en antiparalelo como se muestra en la figura 2.2. Esta disposición puede funcionar con rectificador o como inversor. En caso de funcionar como rectificador puede proporcionar en uno de sus polos una tensión de  $+1/2U_{dc}$  y en el otro  $-1/2U_{dc}$  de forma que  $U_{dc}$  será la diferencia de tensión entre los dos polos. La máxima potencia que puede transmitir este tipo de convertidores depende del rango máximo de trabajo de los IGBTs, actualmente la tensión máxima es 6,5KV.

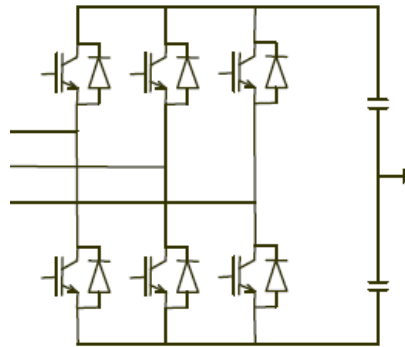


Figura 2.2- Convertidor VSC de dos niveles.

También se puede utilizar una topología multinivel que utiliza varios IGBTs, llegando a la tensión de transporte necesaria. En un convertidor de tres niveles se pueden minimizar la pérdidas, que son entre 2% y 5%, en el cual se puede obtener tres tensiones:  $+1/2U_{dc}$ ;  $-1/2U_{dc}$  y 0.

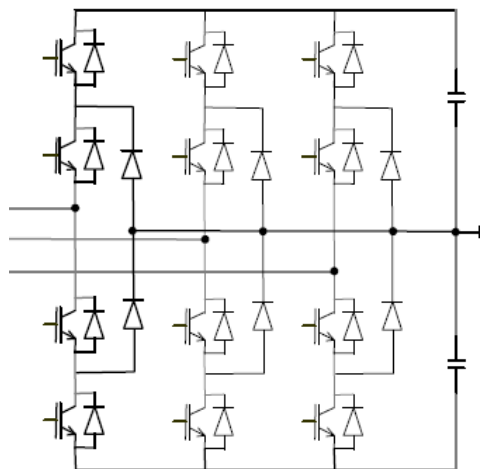
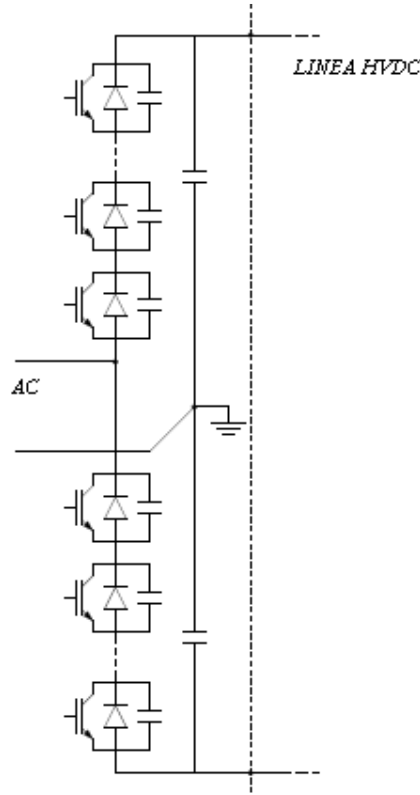


Figura 2.3- Convertidor VSC de 3 niveles.

Para llegar hasta la tensión en corriente continua necesaria para una línea de HVDC, ya que el rango de operación de los IGBTs es limitado, se puede colocar varios IGBTs en serie hasta alcanzarla. Para colocar varios IGBTs en serie deben conmutar simultáneamente, además es muy importante que tengan la capacidad de conmutación independientemente del nivel de potencia transmitido y el control sobre el tiempo de subida de tensión, dichos requisitos son más importantes que las pérdidas de conmutación. Cuando se colocan IGBTs en serie es habitual conectar condensadores en paralelo para distribución de la tensión dinámica y estática entre ellos. Todo esto se traduce en una mayor dificultad de control en el diseño y mayores costes, puesto que los IGBTs son muy caros.



**Figura 2.4- Rama de un rectificador monofásico con IGBTs colocados en serie.**

### **Transformadores**

Los transformadores realizan la función de adecuar el nivel de tensión al adecuado para el funcionamiento de los convertidores por lo tanto debe colocarse uno antes del rectificador y se coloca otro después del inversor para su transporte y/o distribución en los valores óptimos de tensión.

### **Reactancia de fase**

Las reactancias de fase tienen la función de controlar la potencia activa y reactiva mediante la corriente que circula por ellas y también eliminan los armónicos de corriente de alta frecuencia causados por las operaciones de los IGBTs. Por lo tanto se colocará una en cada fase a la entrada del rectificador y a la salida del inversor.



### **Filtros de AC**

Los armónicos producidos por las conmutaciones de los IGBTs pueden causar un mal funcionamiento del sistema eléctrico e influir en equipos de radio y telecomunicación. Para disminuir la magnitud de estos armónicos se colocan filtros de AC. En los sistemas VSC no es necesario componentes para compensar la energía reactiva dado que funciona mediante PWM y este sistema puede controlar la energía activa y reactiva. Por lo tanto se colocaran 6 filtros, dos en cada fase, antes y después de la etapa DC.

### **Condensadores de DC**

Estos condensadores se colocan para minimizar el rizado de la tensión de CC y amortiguar la potencia en los transitorios. Se colocan dos condensadores, uno en cada polo, y su dimensión depende de la tensión que hay en cada polo del sistema.

### **Cables de DC**

Los cables de transmisión de la corriente continua están hechos de un polímero especial que se utiliza por su poco peso, flexibilidad y por sus condiciones mecánicas.

## **2.2.2-Rango máximo de trabajo**

El rango máximo de trabajo de los sistemas VSC esta determinado por el rango de los convertidores. En este tipo de topología se han alcanzado los 350 KV en configuración monopolar, transportando hasta 300MW, en Caprivi Link, Namibia. En la topología bipolar se han alcanzado los  $\pm 150KV$ , transportando 350 MW  $\pm 125MVAR$  trabajando con convertidores de dos niveles, en Estlink, Estonia-Finlandia.

## **2.3.-Topología LCC (Line Commutated Converter)**

Esta topología es la más antigua, esta basada en tiristores ya que hasta hace pocos años eran los únicos dispositivos capaces de proporcionar grandes potencias en la tecnología HVDC. Aunque hay similitud con la topología VSC y CSC, que se describirá mas adelante, difieren en varios aspectos.

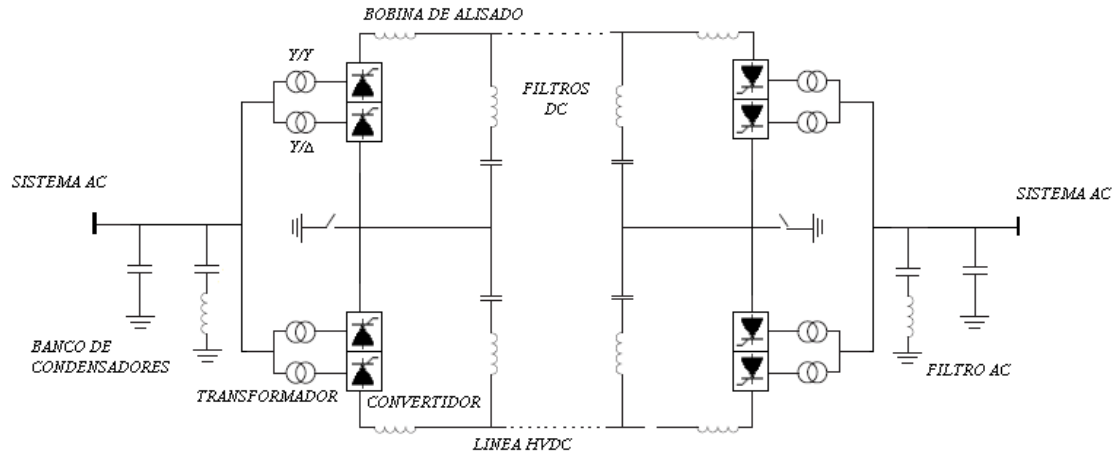


Figura 2.5- Esquema unifilar de un sistema LCC-HVDC.

### 2.3.1.-Dispositivos necesarios

#### Convertidores

Los convertidores usados en esta topología están formados por tiristores, tanto los rectificadores como los inversores. Los tiristores tienen un amplio rango de potencia pudiendo trabajar a altas tensiones y corrientes. Esto facilita mucho el control de estos dispositivos ya que serán necesarios, para una misma tensión que en otras topologías, un número menor de componentes controlados en serie. Con estos convertidores no se puede controlar completamente la potencia reactiva transmitida y será necesario, en caso de una línea muy larga de HVDC, compensadores de reactiva, no siendo así en el caso back-to-back.

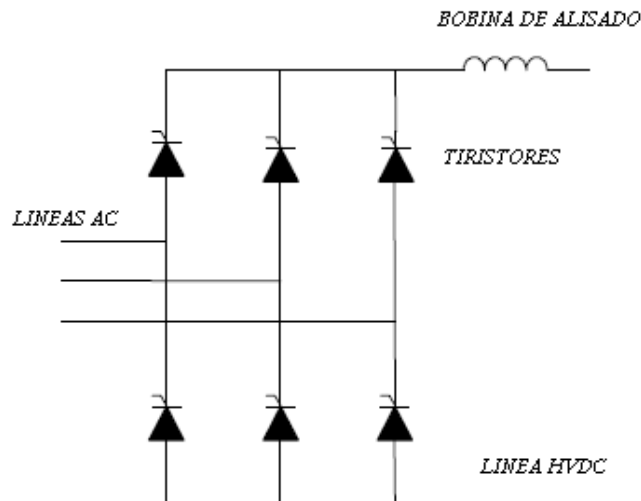
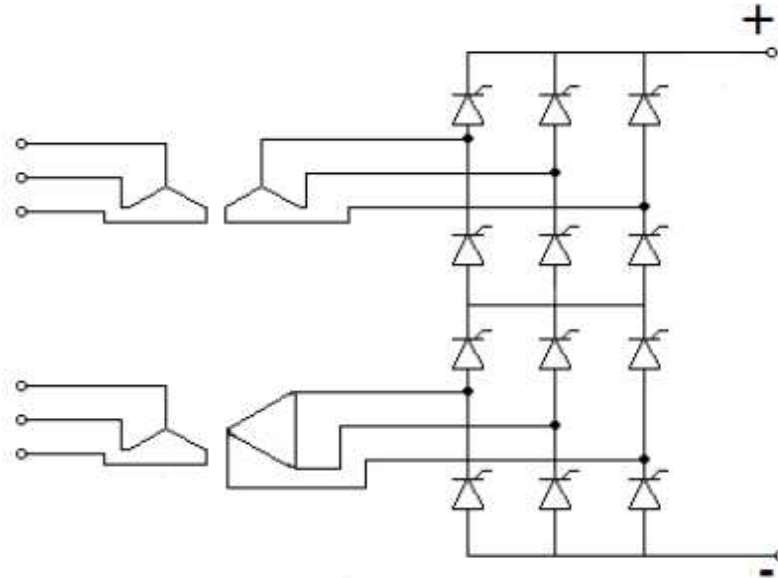


Figura 2.6.- Rectificador e inversor de 6 pulsos con tiristores de topología LCC

La topología básica de convertidores con tiristores se muestra en la figura 2.6. Para alcanzar la tensión necesaria en el transporte HVDC se pueden conectar en serie varios de estos rectificadores sin tener gran complejidad en su control lo cual es una ventaja comparándolo con el sistema VSC.



**Figura 2.7 - Esquema eléctrico de un convertidor de doce pulsos y sus transformadores.**

Son muy utilizados los convertidores de 12 pulsos con transformadores Y/Y y Y/ $\Delta$  ya que eliminan los armónicos de corriente 5° y 7° del sistema en AC y el armónico 6° de DC. Esto ocurre por el desfase producido por los transformadores en las corrientes.

### **Transformadores**

Los transformadores ajustan la tensión de trabajo desde la red AC a la tensión de los convertidores, normalmente en estos transformadores la tensión del lado del convertidor suele ser mayor ya que los sistemas LCC son capaces de funcionar a mayor tensión que los VSC.

En este sistemas se suele conectar a cada convertidor de 6 pulsos un transformador, dado que para alcanzar la tensión son necesarios varios convertidores en serie, habrá el mismo número de convertidores de 6 pulsos que de transformadores.

### **Filtros de AC**

En esta topología los filtros de AC se colocan antes de los transformadores conectados al rectificador y después de los conectados al inversor, para eliminar los armónicos de corriente producidos por el convertidor. La cantidad de filtros necesarios en los sistemas LCC es mayor que en VSC, ya que los convertidores consumen potencia reactiva y estos filtros también tiene la función de generar esa potencia reactiva, también suelen colocar bancos de condensadores para esto ultimo.

A diferencia con los sistemas VSC en el LCC los filtros funcionarán con la tensión primaria de los transformadores conectados al rectificador y la secundaria de los que están conectados a los inversores.

### **Filtros DC**

Estos filtros reducen el rizado de la tensión de DC que produce interferencias en las telecomunicaciones cercanas, por ello es necesario instalar estos filtros al principio y final de

cada línea de transmisión en paralelo con los convertidores. En el caso de un sistema back-to-back no es necesario el uso de estos filtros.

También se colocan en serie con el rectificador y el inversor, es decir, al principio y final de cada línea HVDC, bobinas de alisado que tienen la función de reducir el rizado de la corriente y reducir el pico de corriente en caso de cortocircuito en la línea DC.

### Cables HVDC

Los cables en DC utilizados por todas las topologías tiene las mismas características, solo difieren en si son utilizados como cables aéreos o submarinos. En el caso de configuración back-to-back no se conectan cables de DC al no ser necesaria la transmisión en distancia.

### 2.3.2.-Rango máximo de trabajo.

Los sistemas LCC tiene el rango mas alto de potencia de las topologías HVDC instaladas dado que sus convertidores pueden obtener hasta  $\pm 500\text{KV}$  transmitiendo una potencia de 1200MW, esto es posible gracias al gran rango de tensiones y corrientes que puede soportar los tiristores. En la actualidad algunos fabricantes han anunciado sistemas LCC de  $\pm 800\text{KV}$  capaces de transmitir 1600MW.

### 2.4.-Topología CSC (Current source converters)

Esta topología esta basada en el funcionamiento de los convertidores como fuentes de corriente. Esto también ocurría en la topología LCC donde se usaban tiristores, pero los sistemas CSC utilizan semiconductores en los que se pueden controlar su conducción y bloqueo, a diferencia de los tiristores en los que se puede controlar su conducción pero se bloquean de forma natural.

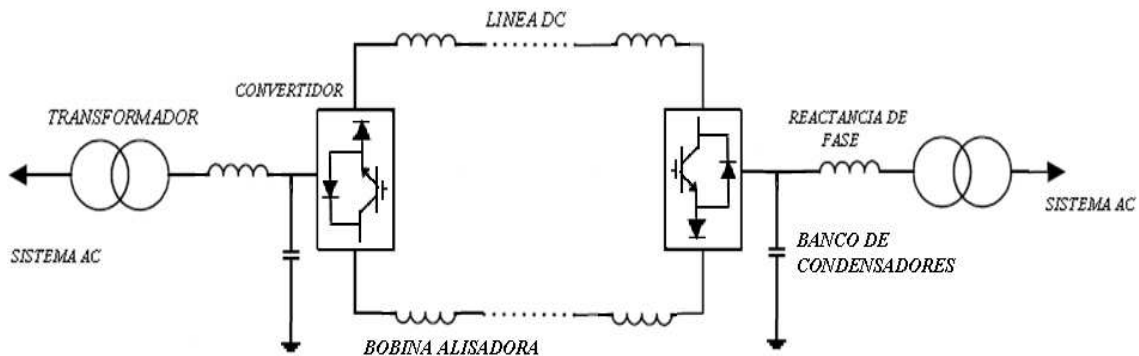


Figura 2.8 - Esquema unifilar de un sistema HVDC-CSC

### 2.4.1-Dispositivos necesarios

La disposición de componentes electrónicos en esta topología es muy similar a la LCC expuesta anteriormente. La principal diferencia es el modo de funcionamiento del convertidor basado en PWM y la consecuente eliminación de armónicos adicional.

#### Convertidor

Estos convertidores pueden estar formados por GCTS o por IGBTs con un diodo en serie y trabajan en PWM dada las características en sus semiconductores. Esto disminuirá la distorsión de la corriente por las líneas, una mejor respuesta dinámica y mejorará el factor de potencia de entrada respecto a LCC. La potencia que pueden transferir estos convertidores es inferior a los convertidores formados por tiristores, dado el menor rango de trabajo de sus semiconductores. De manera que habrá que colocar varios IGBTs o GCTs en serie para conseguir las tensiones deseadas para el transporte de potencia en HVDC. Esto aumenta la dificultad de control de estos semiconductores dado que tienen que conmutar a la vez y eso requiere mayores costes de diseño.

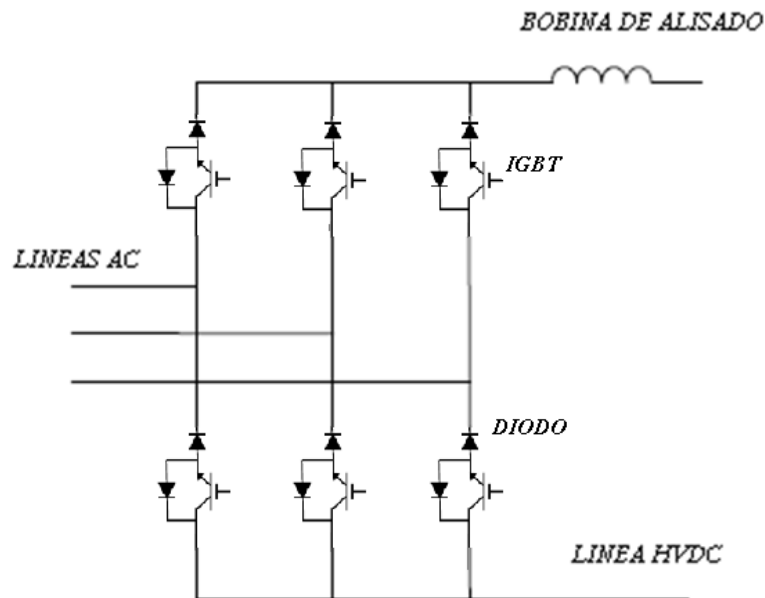
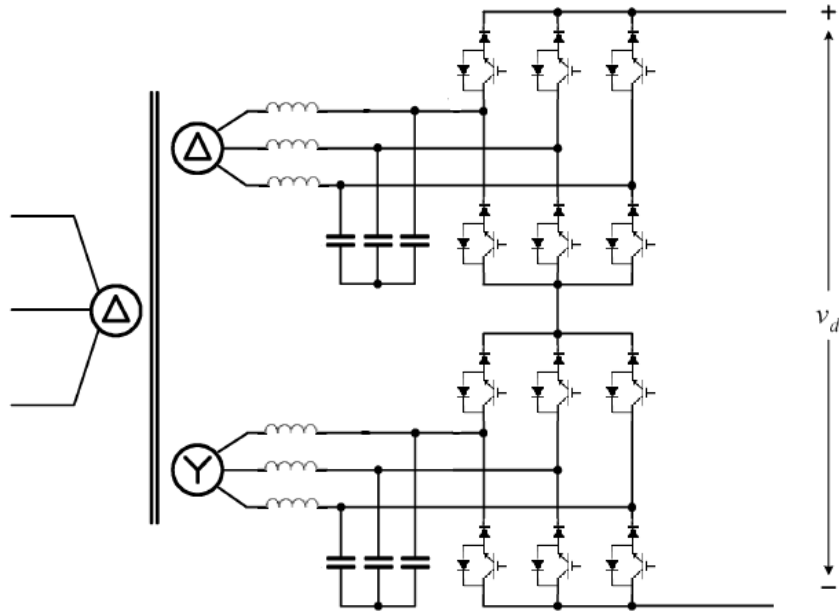


Figura 2.9 - Convertidor CSC basado en IGBTs con diodo en serie.

También se pueden utilizar dos convertidores independientes en serie como se muestra en la figura 2.10 dado que de esa manera será posible eliminar armónicos gracias a los desfases que producen los transformadores.



**Figura 2.10 - Conexión en serie de dos convertidores CSC**

### **Transformadores**

Para una misma potencia nominal que un sistema LCC, el CSC utilizará transformadores con menores tensiones dada la limitación de tensiones en sus convertidores. Se utilizarán tantos transformadores como convertidores sean necesarios en la instalación, independientemente de los elementos conectados en serie de estos.

### **Filtros de AC**

En esta configuración los filtros se colocan entre el transformador y el convertidor. Están formados por una inductancia en serie, la cual tiene la función de reducir la distorsión en la corriente, y un condensador en paralelo con el convertidor para cada fase. Este condensador ayuda a la conmutación de los semiconductores y actúa como filtro para los armónicos de corriente. La potencia de estos condensadores suele ser entre 0.3 y 0.6 p.u. para convertidores de altas potencias que funcionan a frecuencias de pocos cientos de hertzios.

### **Filtros DC**

En la topología CSC se coloca al igual que en LCC una inductancia que actúa como filtro en DC, tiene las mismas funciones, reducir el rizado de la corriente y reducir el pico de corriente en el caso en que se produzca un cortocircuito en la línea de HVDC. Se colocan al principio y final de la línea de los dos polos.

### **Cables de HVDC**

Se utilizan cables de las mismas características que los sistemas LCC pero soportan menos tensión luego sus dimensiones serán diferentes.

### 2.4.2-Rango máximo de trabajo

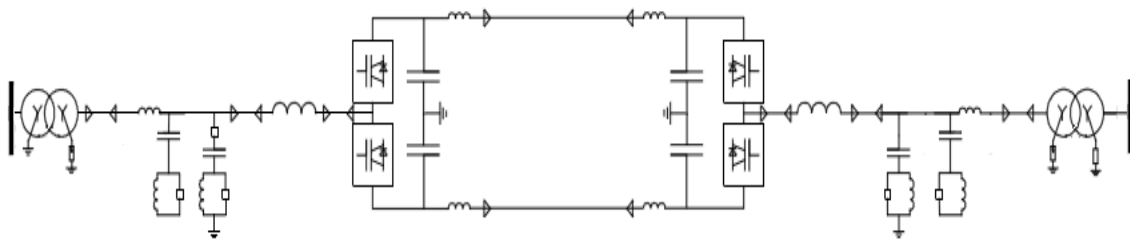
El rango máximo de trabajo esta definido por la tensión y corriente que pueden soportar los convertidores. Puesto que los semiconductores utilizados, IGBTs, tienen menor rango de potencias que los tiristores, la potencia máxima que pueden transmitir estos sistemas es menor que los sistemas LCC.

### 2.5.-Comparación de las características de cada topología

Cada topología descrita tiene unas características distintas que se describirán a continuación. Las dos topologías que se utilizan actualmente en HVDC son LCC y VSC. La tecnología CSC actualmente no es muy usada para el transporte en HVDC pero si en control de motores de media potencia para aplicaciones industriales.

Para comparar los componentes en las distintas topologías se han analizado dichos componentes para dos estaciones convertidoras de VSC y LCC, cada una para su habitual rango de operación instalado actualmente,  $\pm 150\text{KV}$  y  $350\text{MW}$  y  $\pm 500\text{KV}$  y  $1200\text{MW}$  respectivamente.

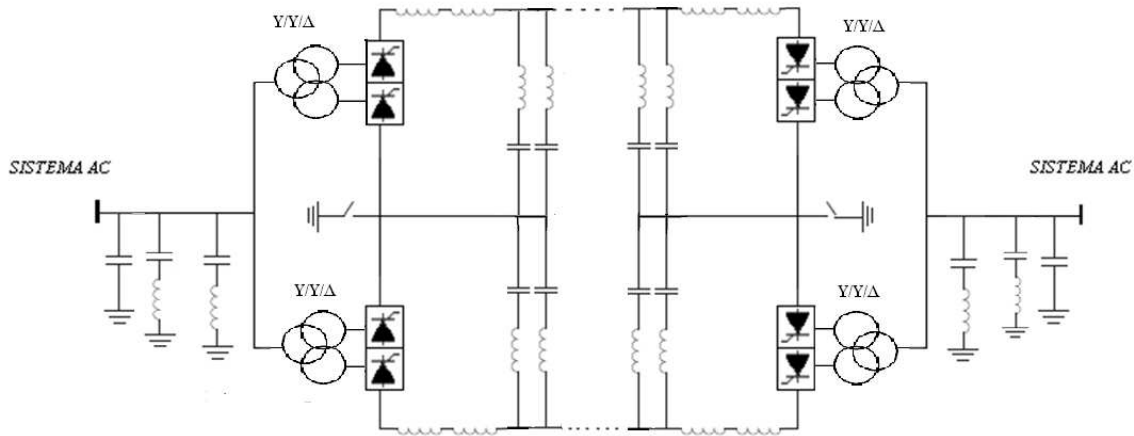
Para el caso concreto de la estación convertidora en VSC de estas características se debe utilizar un transformador trifásico de potencia nominal  $380\text{MVA}$  de configuración Y/Y que transforme la tensión de AC hasta  $195\text{KV}$  que necesita el convertidor para obtener a la salida  $\pm 150\text{KV}$ . Son necesarios 2 filtros de AC doblemente sintonizados para los armónicos  $32^\circ$  y  $60^\circ$ . La potencia de estos filtros no es muy grande dado que el sistema VSC no tiene demanda de potencia reactiva. A continuación se dispone una bobina en cada fase que también actúa como filtro. El convertidor esta formado por 144 IGBTs que se colocan formando un puente de seis pulsos, es decir, 24 IGBTs por válvula. También se dispondrá en paralelo a estos IGBTs un diodo por cada dos IGBTs, por lo tanto deberá soportar el doble de tensión. A la salida del convertidor se coloca un condensador en cada polo de  $1\text{mF}$  y en serie con la línea una bobina alisadora, ambos funcionan como filtros, para obtener una tensión y corriente de mayor calidad en DC. La tensión de salida en el transformador de la estación receptora de HVDC será la del sistema de AC al que esté conectada.



**Figura 2.11 - Esquema unifilar del sistema HVDC –VSC**

En el caso en particular que tratamos en la topología LCC, son necesarios 2 filtros, doblemente sintonizados para los armónicos  $11^\circ$  y  $13^\circ$  y los armónicos  $24^\circ$  y  $36^\circ$ , de  $190\text{MVar}$  cada uno. Además un banco de condensadores de  $190\text{MVar}$ , para cubrir la demanda de potencia

reactiva del convertidor. El convertidor consiste en dos puentes de 12 pulsos que están formados por 2016 tiristores, 84 tiristores en serie por cada válvula, de 7,2KV y 1,5 KA. Cada puente de 12 pulsos es alimentado por 3 transformadores monofásicos Y/Y/Δ de 235/117,5/117,5 MVA que transforman la tensión hasta 505 KV. En la estación receptora 505 KV será la tensión de entrada del transformador. A la salida del convertidor es necesario dos bobinas alisadoras de 225 mH y 112,5 mH y dos filtros de DC doblemente sintonizados para los armónicos 12° y 14° y los armónicos 12° y 36° en cada línea.



**Figura 2.12 - Esquema unifilar del sistema LCC**

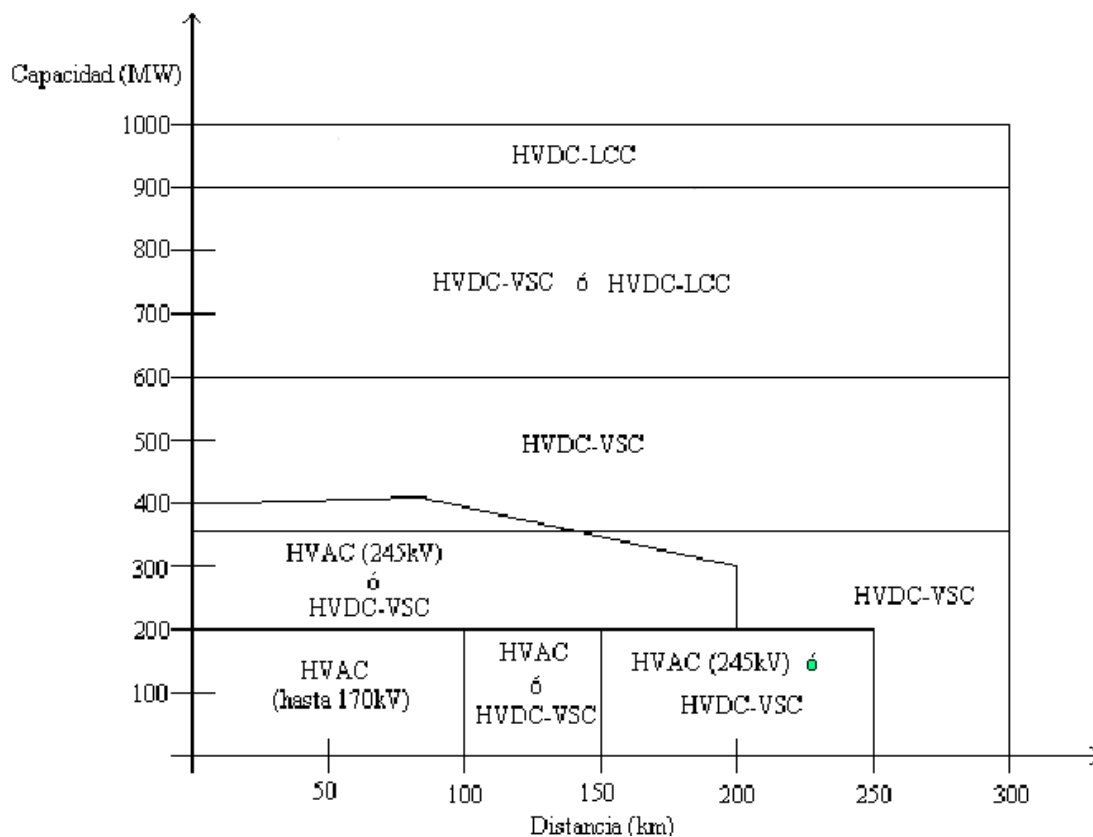
Los rangos de cada topología vienen dados por el rango de operación de los convertidores y por lo tanto de sus componentes. Aunque son importantes los rangos de potencia capaces de manejar los semiconductores de cada topología lo que realmente condiciona el rango del convertidor es el número de semiconductores que es posible controlar en serie de manera fiable. Este control es muy complejo ya que se deben conmutar todos los semiconductores a la vez y controlar la distribución estática y dinámica de la tensión. Hasta el momento el rango de tensión de cada topología es  $\pm 500\text{KV}$  para LCC y 350 KV para VSC.

En lo que a tamaño respecta las estaciones LCC ocupan 4 veces más que las VSC y el tiempo de construcción es de 36 meses, siendo 24 meses en el caso de una estación VSC.

El control que se tiene en cada topología difiere en gran medida y es la principal diferencia entre estas. En el caso LCC se tiene total control de potencia activa, pero tiene demanda de potencia reactiva, para ello se colocan bancos de condensadores, lo cual, da un control discontinuo de dicha potencia. Por lo tanto la potencia reactiva que consume es dependiente de la potencia activa transmitida.

El sistema VSC también tiene control total sobre la potencia activa transmitida, apenas demanda potencia reactiva y es capaz de controlar, gracias a su funcionamiento en PWM, la potencia reactiva entregada. Por lo tanto su control de potencia reactiva es continuo y es independiente de la potencia activa.





**Figura 2.13 - Rangos de potencia de cada topología**

Las paradas programadas para su mantenimiento son mayores en LCC que en VSC,  $\geq 1\%$  y  $\geq 0,5\%$  respectivamente. Por el contrario las pérdidas totales son mayores en VSC, entre 4% y 6%, que en LCC, entre 2,5% y 4,5%.

Los sistemas VSC tienen la capacidad de conectar en configuración multiterminal cuantas estaciones sean necesarias, siendo 3 el máximo de estaciones conectadas en dicha configuración para los sistemas LCC.

El riesgo de fallos por conmutación es mucho menor en VSC ya que no es necesario alta tensión para conmutar los IGBTs, como es el caso de los tiristores, proporcionando más estabilidad en su control.

Otra ventaja de los sistemas VSC es que cada estación, ya sea la rectificadora o la inversora, actúan independientemente, al contrario que la estaciones de LCC con tiristores en la que las estaciones necesitan comunicación entre ellas. Además estas últimas quedan bloqueadas en caso de transmitir por debajo de su potencia mínima y la energía solo puede ser transmitida en una dirección, lo cual no ocurre en VSC donde la línea puede operar transmitiendo 0MW y la transmisión de energía puede ser reversible.

# Capítulo 3

## Simulaciones de topologías en HVDC

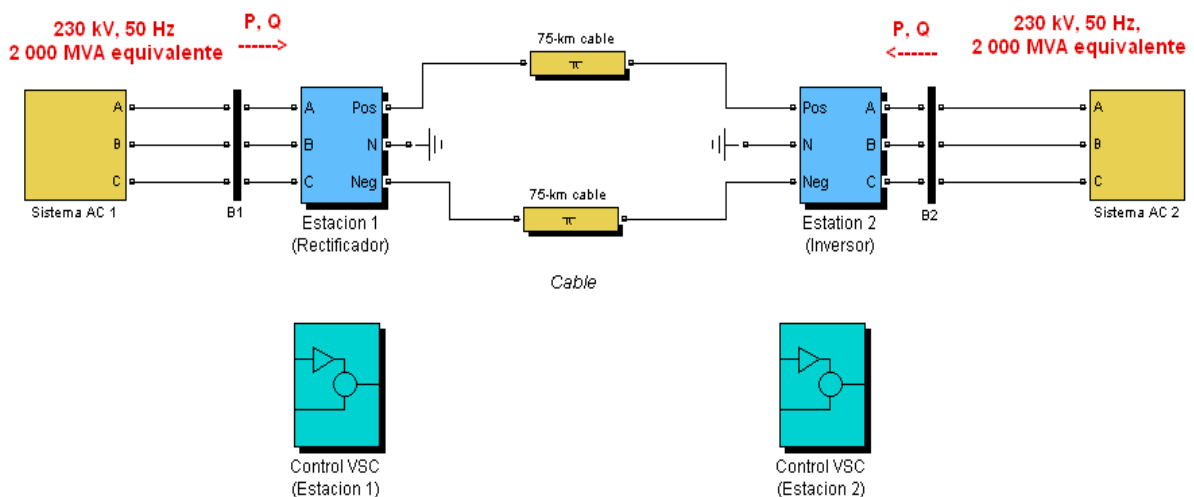
### 3.1.- Introducción

En este capítulo se expondrán simulaciones de las topologías usadas para HVDC descritas en capítulos anteriores que son LCC y la tecnología VSC.

El software utilizado para realizar las simulaciones es Matlab/Simulink 7.10.0, este programa permite construir y controlar cualquier sistema eléctrico, mediante la conexión de los componentes y de los distintos bloques de control.

### 3.2.- Simulación de un sistema HVDC-VSC

El sistema que se va a simular es un sistema HVDC-VSC, el cual sirve de interconexión entre dos sistemas de AC mediante dos líneas de corriente continua de 75 Km. La tensión del sistema VSC será  $\pm 100$  KV y 200 MW.



**Figura 3.1.- Esquema del sistema de transmisión HVDC-VSC (  $\pm 100$  KV; 200 MW)**

La anterior figura muestra el esquema del sistema que vamos a simular en Matlab/Simulink 7.10.0 cuyo funcionamiento se describirá en este capítulo.

### 3.2.1-Componentes del sistema.

Los convertidores son de tres niveles. El rectificador y el inversor están formados por los mismos componentes, la única diferencia entre ellos es el modo de control que se detallará más adelante.

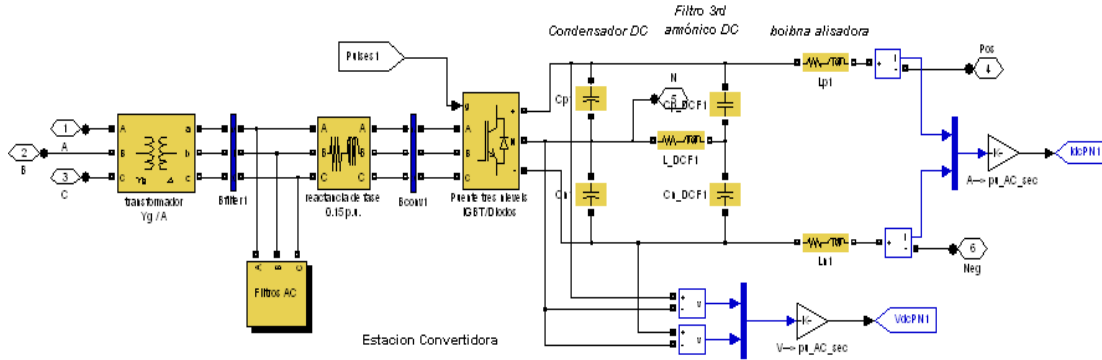


Figura 3.2- Componentes de la estación rectificadora

El rectificador y el inversor funcionan mediante un PWM con 27 pulsos por ciclo. Este dato es muy importante e influirá sobre los filtros utilizados en AC.

$$m_f = 27$$

Para la modulación PWM de seis pulsos los filtros elegidos serán de paso alto y sintonizados para las frecuencias  $m_f=27$  y  $2*m_f=54$  para eliminar los armónicos de altas frecuencias de manera que la tensión a la salida de los filtros sea lo más sinusoidal posible, ya que los armónicos afectan de manera negativa al transformador, aumentando sus pérdidas, etc. Estos filtros supondrán alrededor de un 20% de la potencia nominal. Los transformadores utilizados para esta simulación han sido del tipo  $Y_g/\Delta$  para la eliminación de armónicos.

La estabilidad de la tensión en DC será mayor cuanto mayor sea el valor del condensador dispuesto en DC. Esto puede derivar en su sobredimensionamiento, lo cual no conviene por los altos costes de este tipo de componente. Para reducir el tercer armónico de corriente se ha incluido un filtro a continuación del condensador.

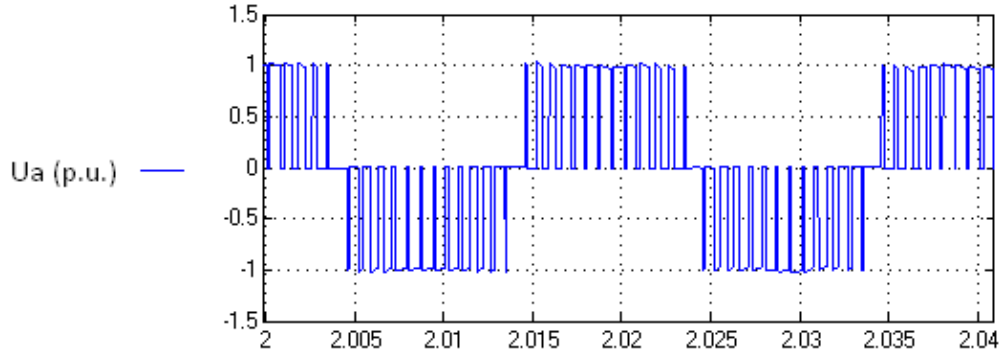
#### 3.2.1.1.- Filtros en los sistemas VSC-HVDC

En este apartado se expondrán los criterios utilizados para el cálculo de los elementos que componen los filtros, tanto en AC como en DC. Estos filtros tienen la función de garantizar la calidad de la electricidad anulando los armónicos que pueden producir muchos problemas tanto en la red eléctrica y sus componentes como en las telecomunicaciones.

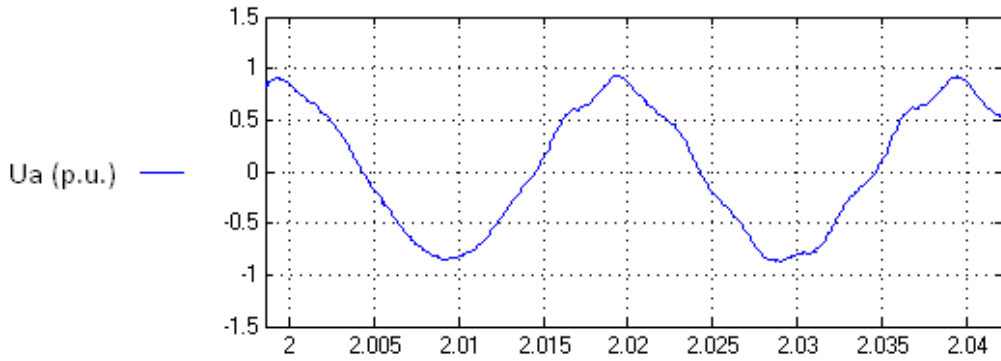
##### 3.2.1.1.1.- Inductancias

Las inductancias de AC deben ser lo suficientemente grandes como para disminuir las variaciones bruscas de corriente causadas por los IGBTs y anular las altas frecuencias de conmutación, pero al mismo tiempo que sus reactancias sean lo suficientemente pequeñas para

que la caída de tensión en ellas se pueda considerar despreciable. Su valor suele estar entre 0,15 y 0,20 p.u.



**Figura 3.3- Tensión antes de las inductancias en serie.**



**Figura 3.4 - Tensión después de las inductancias en serie.**

### 3.2.1.1.2.- Filtros de AC

Para anular los demás armónicos existentes son necesarios filtros sintonizados para frecuencias en particular. Estos armónicos además de neutralizar los armónicos para los que estén sintonizados deben compensar la potencia reactiva consumida por las inductancias anteriormente descritas.

$$Q_l = I_l^2 * X_l = (S_l / V_L)^2 * X_l$$

Siendo en la anterior ecuación  $Q_l$ ,  $I_l$ ,  $X_l$  los valores de potencia reactiva, corriente y reactancia respectivamente por cada fase.

Los filtros de AC empleados en este caso suelen ser filtros LC en serie. Para calcular los valores de la inductancia y del condensador necesarios se ha de tener en cuenta lo siguiente.

El condensador del filtro C tendrá una reactancia para la frecuencia fundamental de:

$$X_{cw1} = \frac{V^2}{Q}$$

Y una reactancia para la frecuencia que se desea anular,  $f_2$ :

$$X_{cw2} = X_{cw1} * \frac{w1}{w2}$$

Para que se produzca la resonancia que anula el armónico se debe cumplir:

$$X_{lw2} = X_{cw2}$$

Por tanto, sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

$$w2 * L = X_{cw1} * \frac{w1}{w2}$$

Llegando así a las expresiones de cálculo finales del condensador y la inductancia de los filtros sintonizados para  $f_2$  :

$$L = \frac{V^2}{Q} * \frac{w1}{w2^2} \qquad C = \frac{Q}{w1 * V^2}$$

Donde Q son los armónicos que se tienen que compensar debido a las inductancias,  $w1$  la frecuencia angular fundamental y  $w2$  la frecuencia angular del armónico que se desea anular.

Normalmente en este tipo de sistemas se instalan dos filtros sintonizados para la frecuencia de conmutación,  $m_f$  y para  $2 * m_f$ . En el caso de estar diseñadas para frecuencias muy específicas el factor de calidad de estos filtros debe ser alto para garantizar su eficiencia. En caso de ser necesario un filtro para muy altas frecuencias la mejor opción es instalar filtros con factor de calidad bajos y un amplio ancho de banda.

### 3.2.1.1.3.- Filtros en DC

El objetivo de los filtros en DC es permitir el paso de la corriente en DC y eliminar las componentes de altas frecuencias. Aunque es posible instalar filtros sintonizados, para una o dos frecuencias, el número y tipo de ellos dependerán de cada caso en concreto. El filtro principal utilizado en la mayoría de las estaciones HVDC se compone de un condensador en paralelo y una inductancia serie las cuales se calculan siguiendo los siguientes criterios:

Modelando la carga como una resistencia equivalente:

$$R = \frac{V^2}{P}$$

El condensador del filtro debe cumplir:

$$R * C \gg T * C$$

De manera que el valor del condensador será:

$$C \gg \frac{1}{f * R}$$

Siendo  $T$  el periodo y  $f$  la frecuencia del armónico que queremos anular. Para reducir los armónicos con un filtro  $L$  se escoge:

$$X_c \ll X_L$$

Por tanto:

$$10 * X_c = X_L$$

Ambos cálculos para la frecuencia  $f$  que se desea anular.

$$X_L = 2\pi f * L$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Normalmente los armónicos a eliminar en DC son los de la frecuencia de conmutación. También afectará el filtro a armónicos cercanos y superiores en frecuencia.

### 3.2.2- Control

El control para este tipo de sistemas es complejo y está basado en un control vectorial que es aplicado al inversor y al rectificador.

Este control permite controlar la potencia activa y reactiva de modo continuo y es la principal ventaja de esta topología frente a LCC con tiristores. Dicho control se detallará a continuación.

El esquema que obedece el control de este sistema es el siguiente:

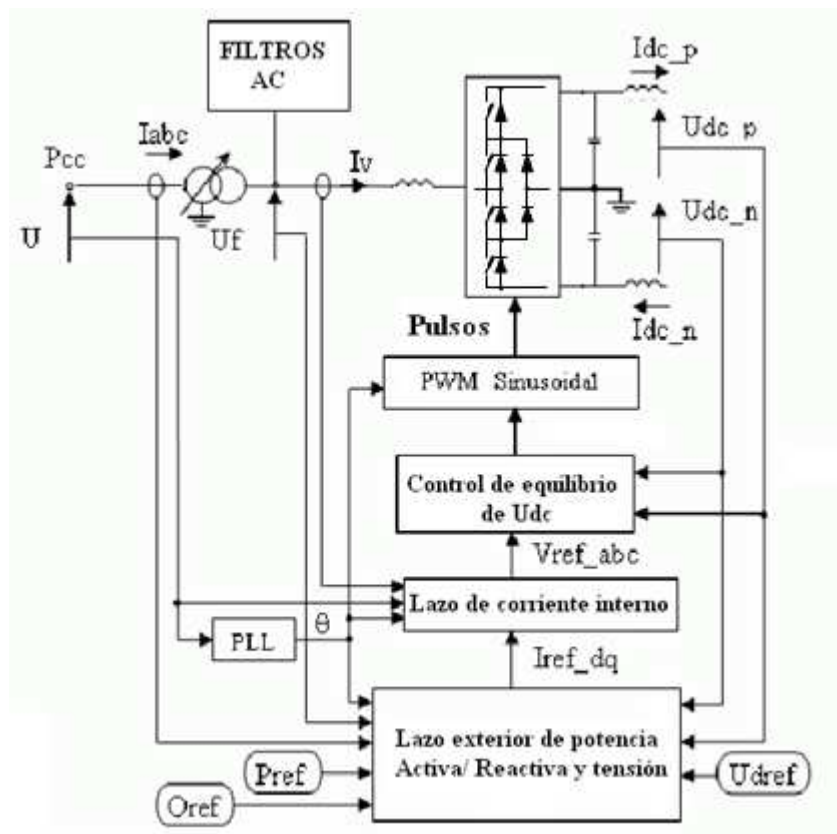


Figura 3.5 - Esquema simplificado de control en VSC

Las dos estaciones se controlan independientemente una de la otra y tiene dos grados de libertad y dos modos de funcionamiento. Puede funcionar controlando el flujo de potencia activa y reactiva al mismo tiempo o controlar el flujo de potencia reactiva y la tensión de corriente continua. Para un funcionamiento óptimo la estación rectificadora debe funcionar con un control de potencia activa y reactiva y la estación inversora con un control de potencia reactiva y tensión de corriente continua.

Como alternativa al control de la potencia reactiva sería posible un control de la tensión en AC pero requeriría un regulador extra que no forma parte de este modelo.

A continuación se describirá cada bloque que compone el control y sus componentes.

### **3.2.2.1- PLL (phase locked loop)**

El PLL mide la frecuencia del sistema y el ángulo síncrono  $\theta$  ( $\sin\theta$  y  $\cos\theta$ ) que es necesario para el cálculo de las transformaciones d-q.

El PLL, junto a las transformaciones de Clark, que convierten las tensiones y corrientes en valores  $\alpha$ , eje real, y  $\beta$ , eje imaginario, a la vez de rotarlas, si es necesario, por el tipo de transformador elegido, y las transformaciones d-q, que transforman los valores  $\alpha$  y  $\beta$  en valores para los ejes d-q (ejes de rotación), son necesarios para introducir los datos medidos del sistema de manera adecuada en los bloques de control.

### **3.2.2.2.- Lazo exterior de potencia activa, reactiva y de tensión**

La función de este bloque es calcular la corriente de referencia en los ejes d y q que necesita el siguiente bloque de control como entrada. Para el eje d tiene dos modos de control: el flujo de potencia activa y la tensión en DC. Para el eje q se controla el flujo de potencia reactiva, también podría realizarse para este eje un control de tensión AC, no siendo así en este caso.

Para realizar su función este bloque está formado por otros 5 bloques que se muestran en la figura:

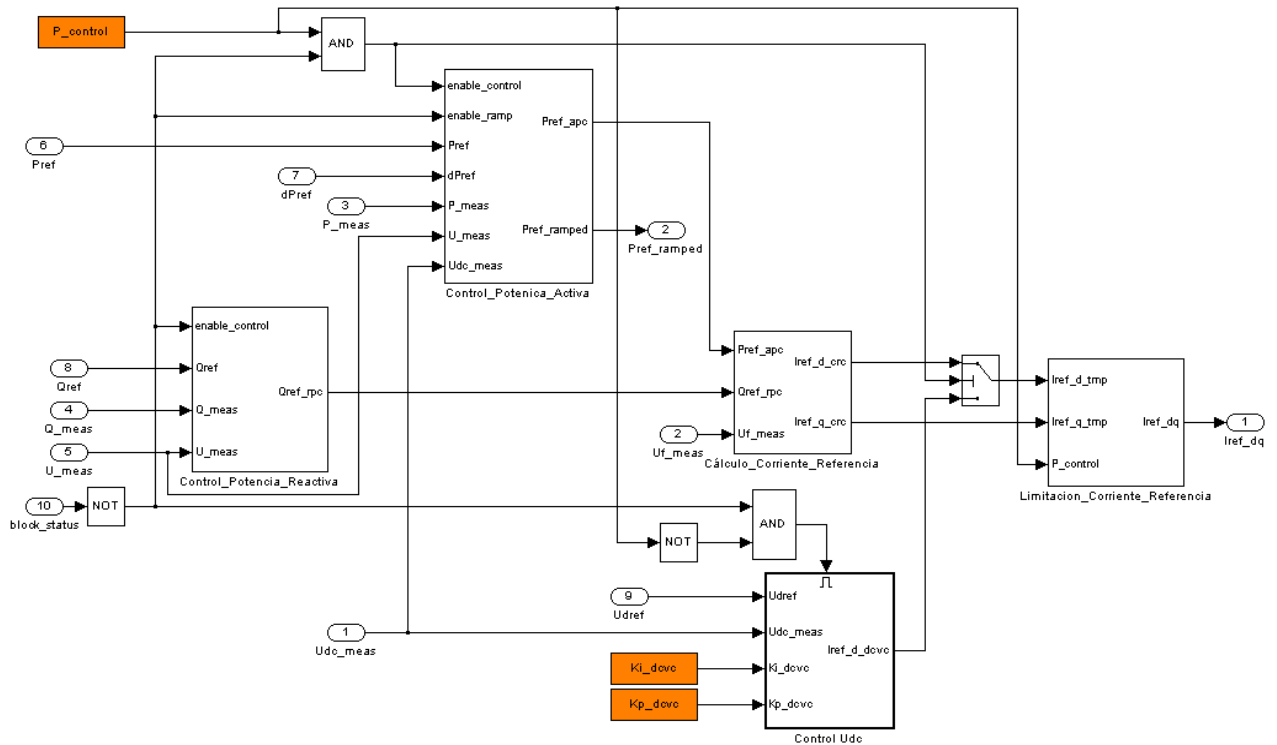


Figura 3.6- Esquema interno del lazo exterior de potencia activa, reactiva y de tensión.

#### - Control de potencia reactiva.

Funciona con un control PI que se activa cuando hay una alteración de la tensión de AC en el sistema, hasta entonces la consigna de Q de referencia pasa directamente como orden de salida.

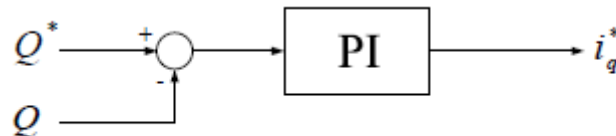


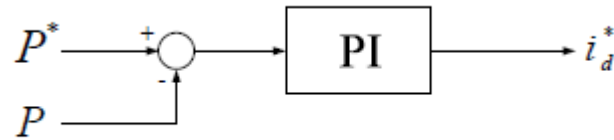
Figura 3.7 - Esquema de control simplificado de los bloques de control de potencia reactiva y calculo de la corriente de referencia.

Además hay otro regulador adicional que reemplaza el control de la tensión AC y que anula el control de potencia reactiva para mantener la tensión dentro de un rango seguro. Esta basado en dos reguladores PI, estos actúan cambiando la Q de referencia de salida cuando algún límite de tensión se sobrepasa.

#### - Control de potencia activa

El tipo de control es muy similar al de la potencia reactiva, es decir, un control PI que calcula a corriente de referencia.





**Figura 3.8 - Esquema de control simplificado de los bloques de control de potencia activa y calculo de la corriente de referencia.**

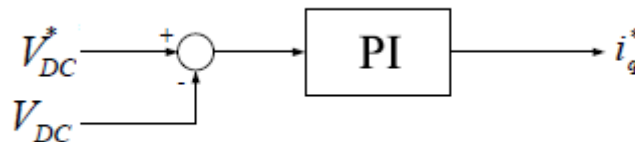
Una diferencia entre ellos es que hay un control adicional sobre la rampa de potencia activa a la entrada del regulador, no incluida en el esquema.

De manera similar al control de potencia reactiva, un bloque reemplaza al control de la tensión en DC. Está formado por dos reguladores PI y su función es mantener la tensión en un rango seguro para la instalación. Estos reguladores solo actúan si los límites son sobrepasados.

#### - Control de la tensión DC

Este bloque solo funcionará cuando el modo de control de tensión en DC este activo, de manera que está conectado con el bloque regulador de la potencia activa mediante un sistema lógico para que solo uno de ellos funcione, es decir, los dos no pueden actuar a la vez.

Este control usa un regulador PI en el que la entrada es la diferencia entre la tensión de DC de referencia y la tensión en DC medida y filtrada. La salida del regulador pasa por un limitador que limita la corriente de referencia del eje d.



**Figura 3.9 - Esquema de control simplificado del bloque de control de Udc.**

A diferencia del regulador de potencia activa, el cual entrega una referencia de potencia activa para que otro bloque calcule la corriente para el eje d, este bloque entrega la referencia de corriente para el eje d ya calculado.

#### - Cálculo de corriente de referencia

Este bloque tiene como entrada las potencias de referencia de los bloques reguladores de potencia activa, potencia reactiva y la tensión en los filtros. A partir de estos datos, su función es calcular las corrientes de referencia en el eje d y el eje q. En caso de estar activo el control de tensión en DC solo calcularía la corriente de referencia del eje q.

### - Limitación de la corriente de referencia

Este bloque limita el vector de referencia a un valor aceptable para la instalación. En el modo de control de potencia activa se impone la misma limitación a esta que a la potencia reactiva. En el modo de control de la tensión en DC se da prioridad a la potencia activa para un control más eficiente de la tensión DC. De modo que la salida de este bloque serán las corrientes de referencia en los ejes d y q, que era el objetivo del cálculo al agrupar los 5 bloques de control descritos.

### 3.2.2.3.- Lazo de corriente interno

El siguiente bloque a describir, a partir de la referencia de corriente dq, la tensión de AC y la corriente del convertidor, calcula las tensiones de referencia para la modulación PWM de las tres fases. A continuación se describirá cada una de sus etapas.

Los bloques que forman el lazo de corriente interno están conectados como se observa en la figura 3.10

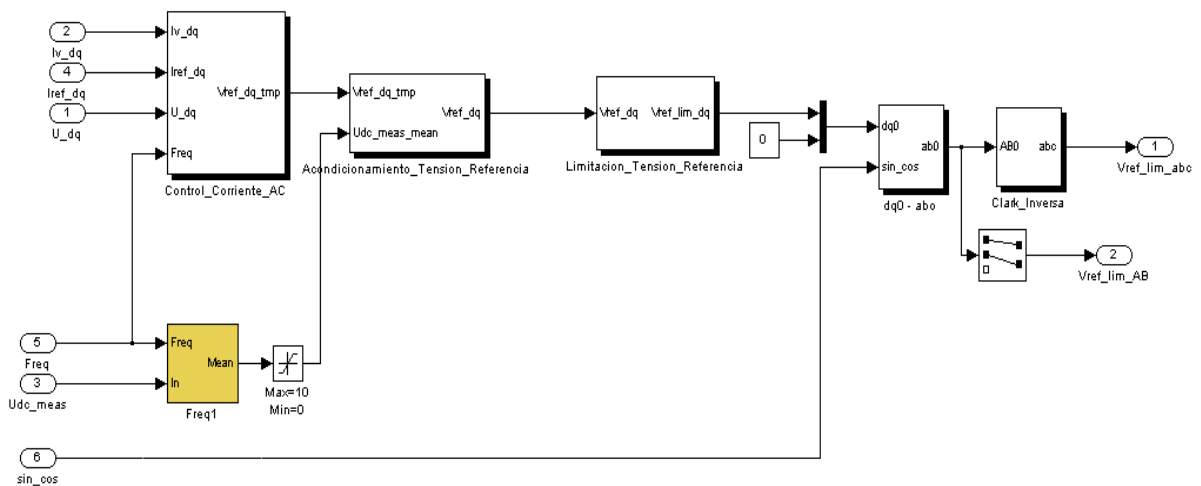
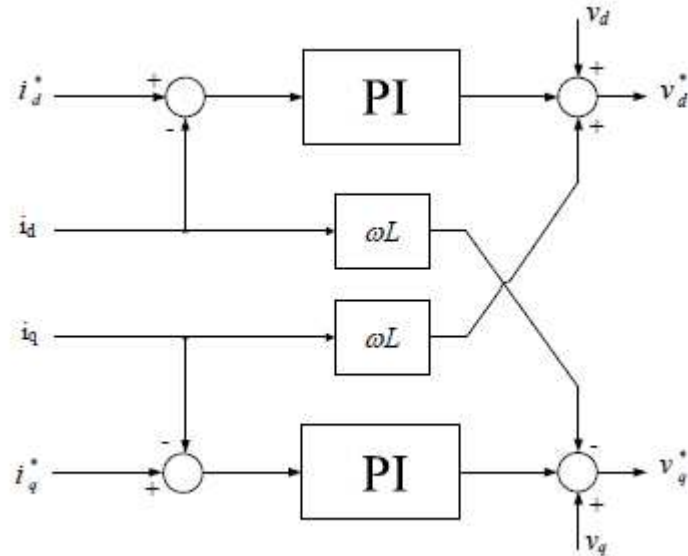


Figura 3.10 - Esquema simplificado del lazo interno de corriente

El primer bloque de control de la corriente en AC funciona con un control feedforward con dos reguladores PI para una rápida respuesta ante cambios de carga o cortocircuitos y para obtener un error nulo en estado estacionario. Para conseguir un control independiente de las componentes d y q, que en este bloque estas están desacopladas. La salida de este primer bloque de control es el vector de tensión de referencia d-q sin limitaciones.

El bloque de acondicionamiento de la referencia de tensión calcula el vector de referencia tensión d-q optimizado a partir de la actual tensión en DC y el valor máximo de pico teórico de tensión de fase en relación a la tensión en DC.

A continuación el siguiente bloque limita el vector de referencia de tensión a un valor máximo de 1.0 para evitar la sobremodulación. Los siguientes bloques realizan las transformaciones d-q y Clark de manera inversa para generar las tensiones de referencia de las tres fases para el PWM.



**Figura 3.11 - Esquema de control del lazo interno de corriente**

En caso de que el modo de control sea de potencia activa esta salida será la que reciba el generador de pulsos para PWM pero si el modo de control elegido es de tensión en DC la salida del lazo de corriente interno será la entrada del bloque de control de equilibrio de la tensión de DC.

#### 3.2.2.4- Control del equilibrio de tensión de DC

Como ya se ha descrito, este control puede estar activado o desactivado. En equilibrio se controla la diferencia entre las tensiones positiva y negativa para mantenerlas equilibradas. Puede haber variaciones en el sistema debidas a los cambios de flujo de potencia activa y reactiva, para mantener el equilibrio este bloque añade una componente que se suma a la tensión de referencia que es calculada en el lazo interno de corriente. Esto puede distorsionar la tensión del convertidor y por ello este control debe ser lento.

El control se produce adecuando la salida de un regulador PI dependiendo de los signos de la tensión de referencia y la corriente del convertidor.

#### 3.2.3- Comportamiento dinámico del sistema VSC-HVDC

En este apartado se mostrará el comportamiento dinámico del sistema VSC. Para ello se simularán y observarán las condiciones en las que es necesaria una buena respuesta dinámica:

- Arranque
- Cambio de referencia de potencia activa, reactiva y de tensión Udc.
- Recuperación ante perturbaciones en el sistema de AC.

### 3.2.4.- Arranque

La figura muestra las condiciones de la estación rectificadora en la simulación de un arranque del sistema, en el que a partir de  $t = 0.3\text{s}$  se produce una rampa del valor de referencia de potencia activa hasta llegar a 1 p.u., puede observarse en la figura como llega a estabilizarse el sistema aproximadamente en  $t = 1.3\text{ s}$ . Se observa como el control de potencia reactiva después del arranque, es decir, una vez llegado al equilibrio hace que esta sea cero en la estación rectificadora.

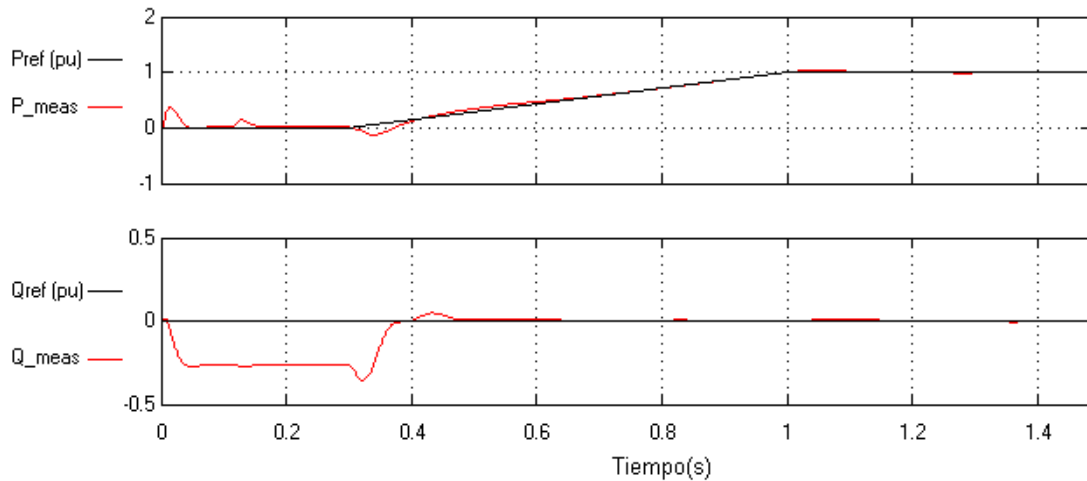


Figura 3.12 - Respuesta dinámica del sistema VSC ante un arranque

### 3.2.3.- Cambio de referencia de potencia activa, reactiva y de tensión $U_{dc}$ .

A continuación se muestra como responde el sistema cuando se introduce un escalón en su referencia de potencia activa, reactiva en la estación rectificadora y también en la tensión de corriente continua de la estación inversora. Observándose la rápida respuesta del control ante estas variaciones y por tanto su estabilidad.

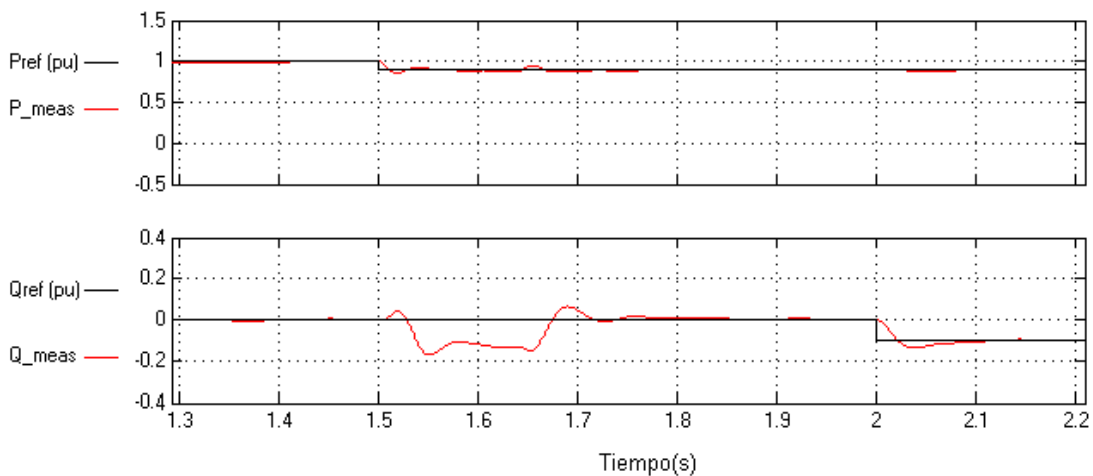
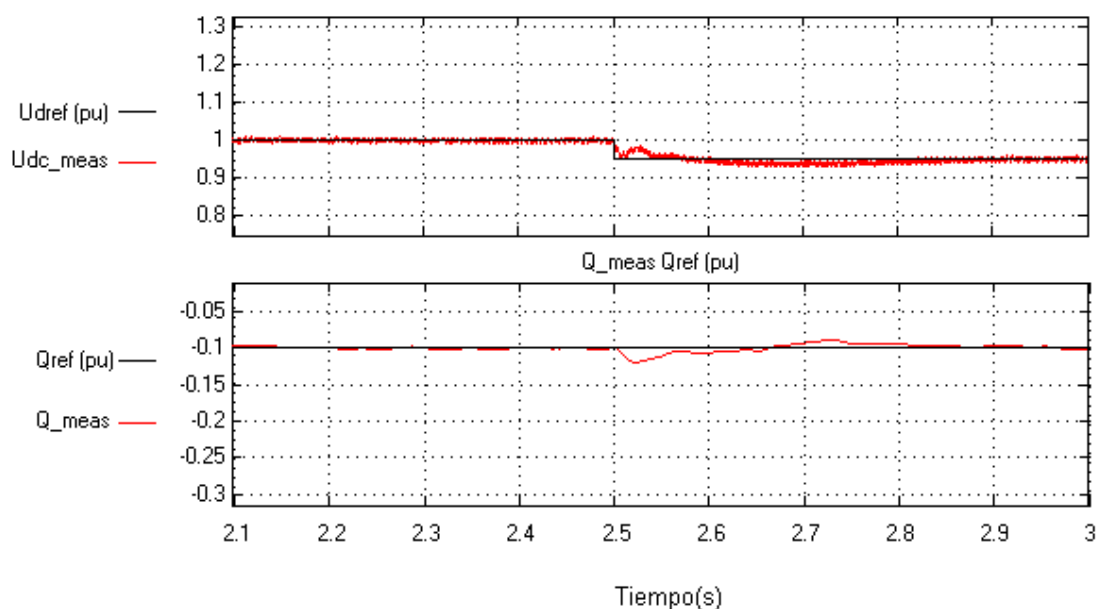


Figura 3.13 - Respuesta dinámica ante escalón de referencia de potencia activa y reactiva

Tanto para la potencia activa como para la potencia reactiva la magnitud del escalón producido en sus referencias es igual a -0.1 p.u. y se producen en  $T=1,5$  s y  $T=2$  s respectivamente. Se observa en la figura 3.13 que el cambio ante escalón de la potencia activa se estabiliza en un tiempo aproximado a 0,3 s y afecta directamente a la potencia reactiva. El escalón de potencia reactiva se estabiliza en un tiempo aproximado de 0.1 s y también afecta, aunque en menor medida a la potencia activa.

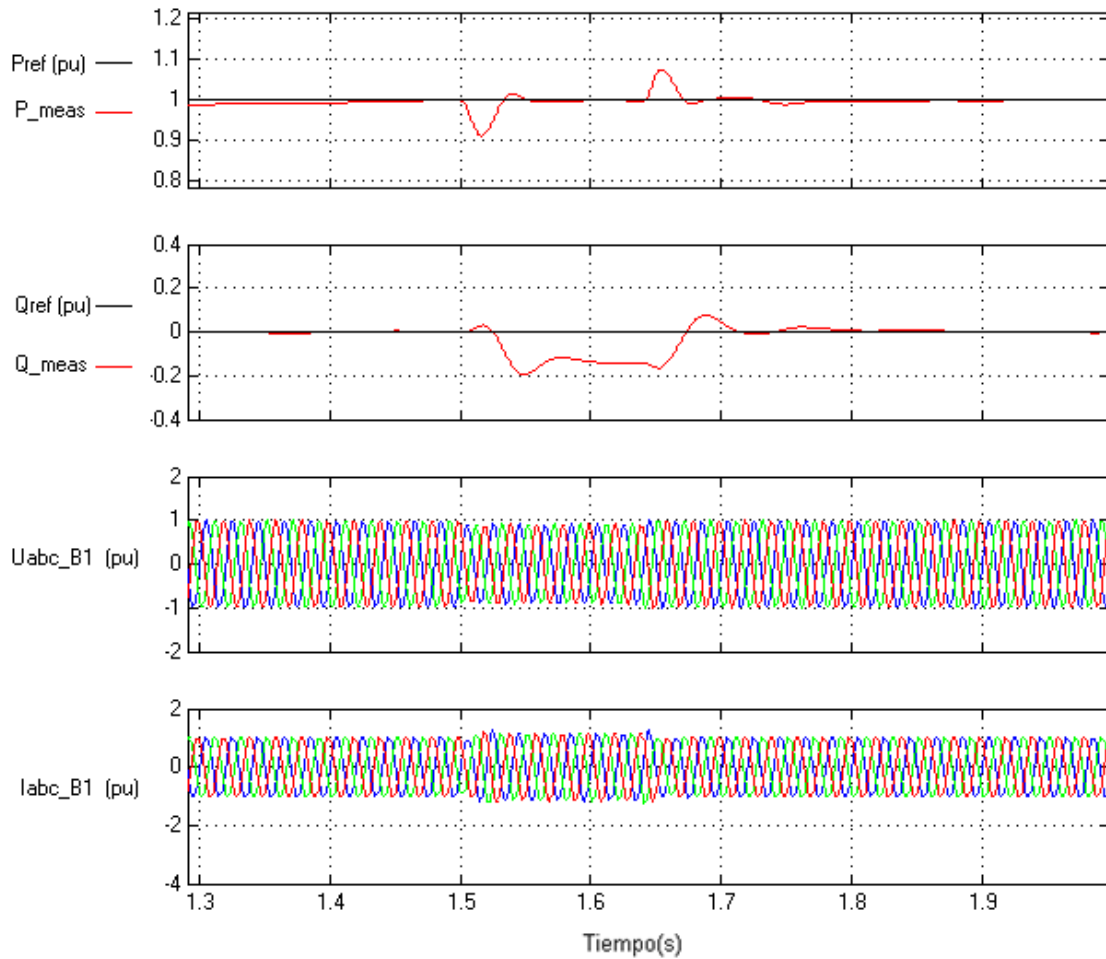
En la figura 3.14 se muestra la respuesta dinámica ante un escalón en la  $U_{dc}$  en la estación inversora. Como se puede ver el control estabiliza la  $U_{dc}$  y afecta directamente a la potencia reactiva transmitida que se estabiliza en cerca de 0,3 s.



**Figura 3.14 - Respuesta dinámica ante un escalón de referencia de  $U_{dc}$**

### 3.2.4.- Recuperación ante perturbaciones en el sistema de AC.

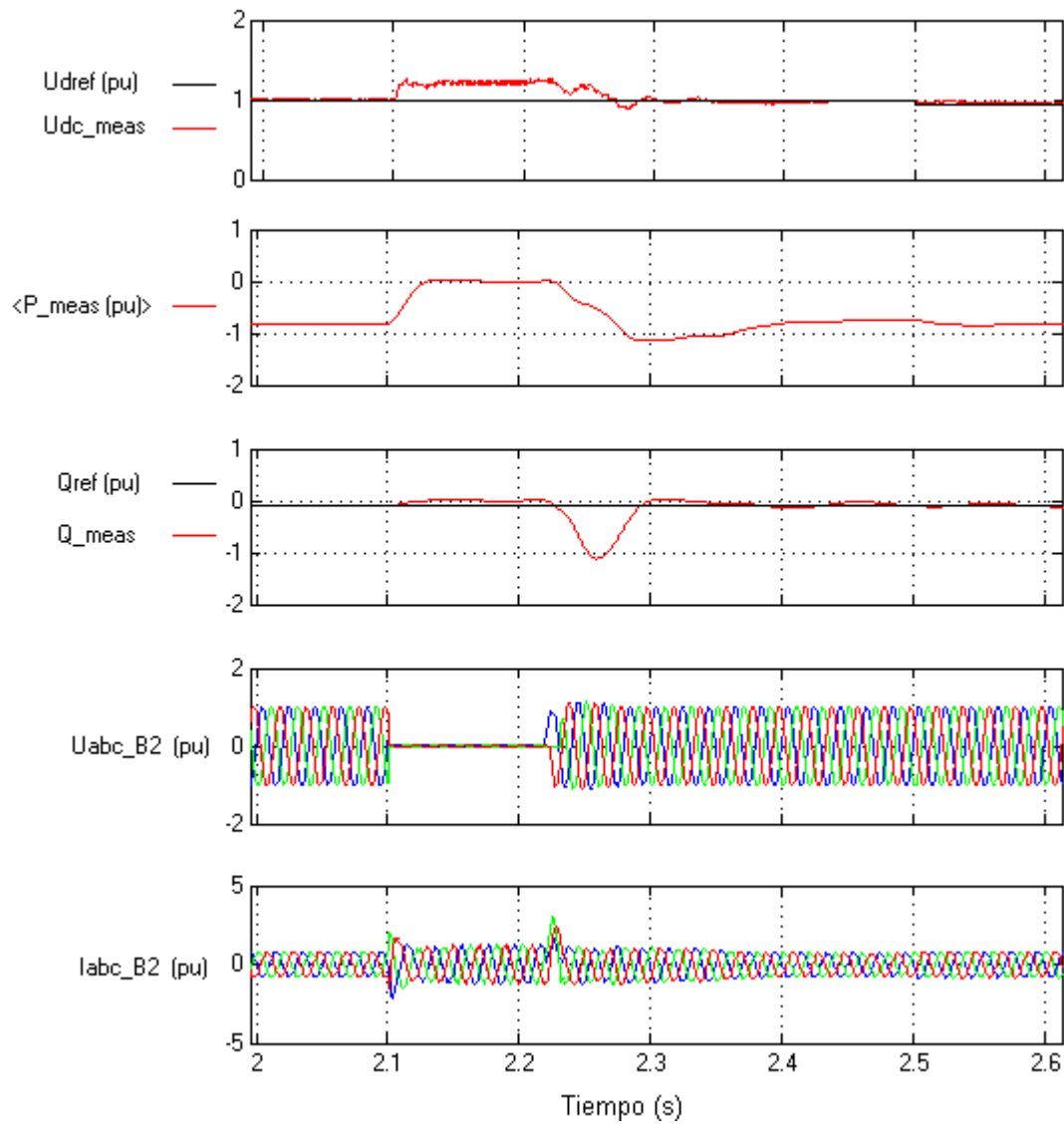
En primer lugar se simulará una perturbación de un escalón de tensión de AC en la estación rectificadora y después un cortocircuito trifásico en el sistema de AC de la estación inversora.



**Figura 3.15 - Respuesta dinámica ante un escalón de tensión en AC en la estación rectificadora.**

El escalón en la tensión de AC se produce en  $t = 1,5$  y dura 0,14 s. y produce desviaciones en la potencia activa, 0.1 p.u. aproximadamente, y en la potencia reactiva 0.2 p.u. Estas desviaciones son corregidas rápidamente.

En segundo lugar se simulará un cortocircuito trifásico a tierra en el sistema de AC de la estación inversora que dura 0,12 s en el cual puede observarse como se eleva la tensión en  $U_{dc}$ . Actuando el control de tensión, que anula el control de potencia activa en el controlador de la estación rectificadora en caso de sobrepasar los límites de  $U_{dc}$ , se logra alcanzar los valores nominales estables en aproximadamente 0,5 s.



**Figura 3.16 - Respuesta dinámica ante un cortocircuito en la estación inversora.**

### 3.3.- Simulación de un sistema LCC

El sistema que se simulará en Matlab/Simulink es un LCC. Se trata de simular una interconexión ente dos sistemas de AC, de distintas frecuencias mediante una línea HVDC de 300 Km que funciona a 500KV y transmite 1000 MW.

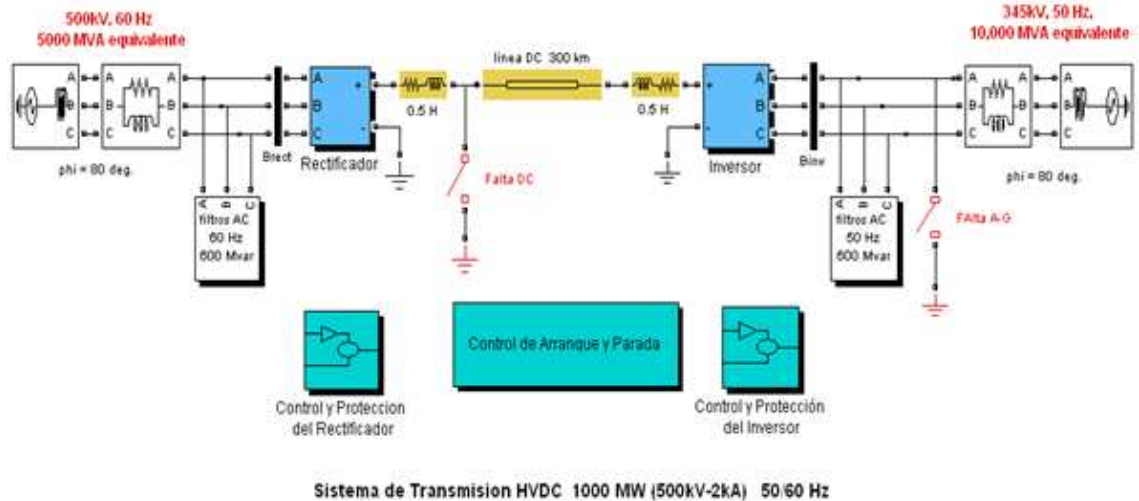
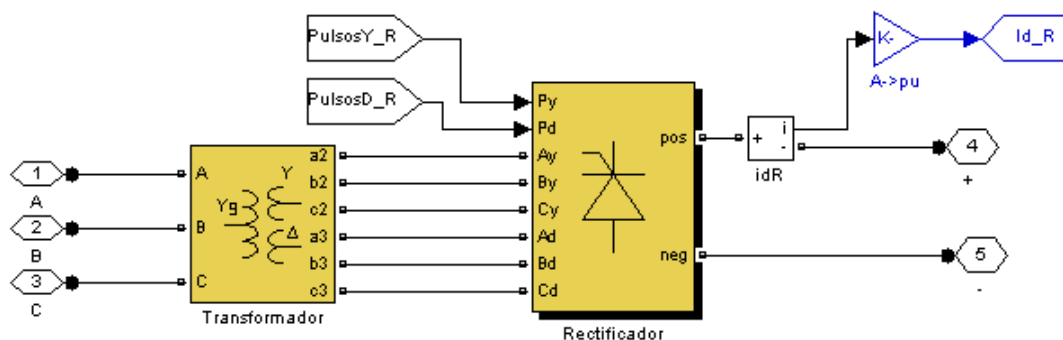


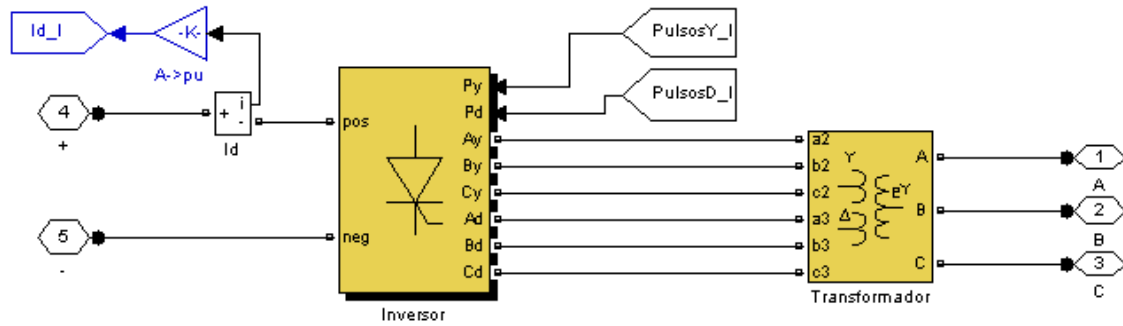
Figura 3.17 - Esquema del sistema HVDC-LCC con tiristores (1000MW, +-500KV) implementado en Matlab/Simulink

#### 3.3.1.- Componentes del sistema

Los sistemas que interconexiona la línea HVDC están modelados por sus equivalentes RL como un sistema de 5000 MVA que funciona a 500KV y 60 Hz, en el caso del sistema conectado al rectificador, y 10000 MVA, 345 KV y 50 Hz, el sistema conectado al inversor. Ambos con un desfase de  $80^\circ$  en su frecuencia fundamental.

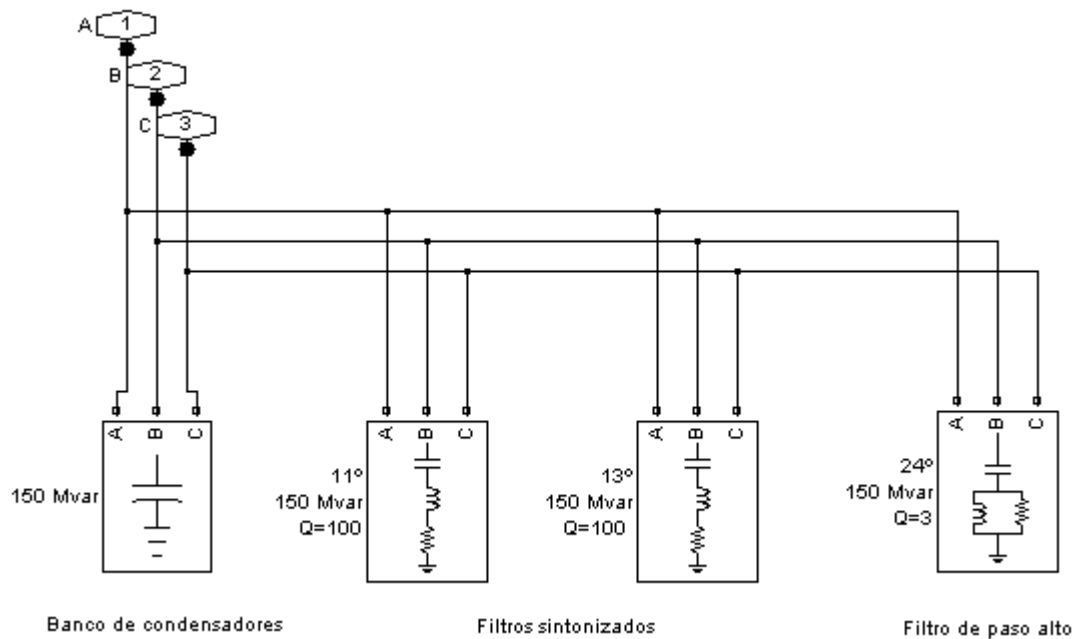






**Figura 3.18 - Esquema de componentes del bloque rectificador e inversor**

Los convertidores utilizados son de 12 pulsos y están conectados a un transformador Y/Y/ $\Delta$  para la reducción de armónicos. Cada devanado secundario tendrá una tensión nominal de 200 KV y la potencia del transformador será 1200 MW. Como estos convertidores funcionan con 12 pulsos los armónicos de corriente producidos en la red de AC serán el 11°, el 13°, el 23° y el 25°, es decir,  $n^\circ$  pulsos  $\pm 1$  y  $n^\circ$  pulsos  $\pm 2$ . Para compensar estos armónicos se instalan 3 filtros de 150 MW cada uno, sintonizados para el armónico 11°, el primero, 13°, el segundo, y el 24°, este será de tipo paso alto, el cual anulará los armónicos 23° y 25°. Además de un banco de condensadores, por si fuera necesario, su conexión o desconexión para el flujo de potencia reactiva.

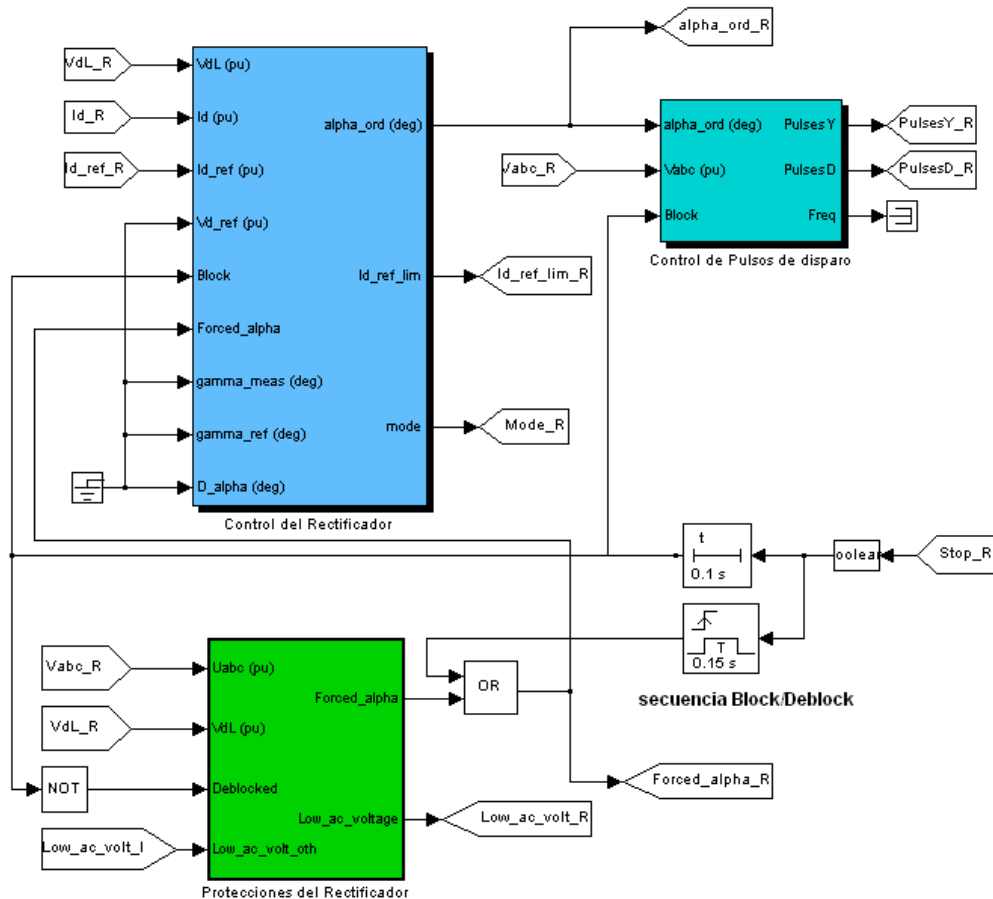


**Figura 3.19 - Esquema de componentes de filtros de AC**

Dichos convertidores también producirán armónicos en la etapa HVDC, estos serán  $n^\circ$  pulsos  $\times 1$  y  $n^\circ$  de pulsos  $\times 2$ , es decir los armónicos 12° y 24°. Estos son anulados por la inductancia, de valor 500 mH, colocada a la salida y entrada del rectificador e inversor respectivamente.

### 3.3.2- Control

El sistema de control está formado principalmente por 3 reguladores, un sistema VDCOL (Voltage Dependent Order Limiter), y el control de generación de pulsos que recibirán los tiristores para adecuar la tensión y corriente con el fin de una óptima transmisión de potencia y protección de los componentes del sistema.



**Figura 3.20 - Esquema de control del sistema.**

Estos sistemas necesitan ser muy fiables y rápidos en cualquier régimen de operación ya que transportan grandes cantidades de energía eléctrica.

El control para el rectificador y el control para el inversor son prácticamente iguales, la única diferencia es el modo de cálculo del ángulo Gamma.

El sistema trabaja con 3 reguladores PI: regulador de tensión en continua Vdc, regulador del ángulo Gamma y regulador de corriente en continua Idc. Los tres reguladores calculan el ángulo de disparo  $\alpha$  a partir del error entre las magnitudes medidas y las de referencia. De modo que la orden que recibirá el control de disparo será el mínimo valor de  $\alpha$  resultante de los tres controladores.

El sistema VDCOL (Voltage Dependent Order Limiter), juega un papel importante a la hora de controlar el sistema ante perturbaciones, ya sean en la etapa DC como en la etapa AC. En este caso cuando se detecta que la tensión Udc es menor de 0,6, la Idc de referencia descende hasta un nivel seguro de corriente, normalmente  $0,3 * Idc$  de referencia (p.u), esta

referencia se introduce en los controladores para que actúen en consecuencia. Cuando se recupera el nivel de tensión  $U_{dc}$  la  $I_{dc}$  de referencia sube progresivamente hasta llegar a condiciones estacionarias.

En el control se incluye un bloque que calcula en que modo de control opera el sistema, es decir, a que orden de  $\alpha$  responde el sistema en cada momento. Estos modos de control pueden ser: control de corriente (1), control de tensión (2), control de gamma (6), limitación mínima de  $\alpha$  (3), limitación máxima de  $\alpha$  (4) y  $\alpha$  constante o forzado (5). Se observará así que modo de control actúa en las simulaciones.

### **Control de disparo**

El control de disparo está basado en un bloque PLL (Phase Locked Loop) que mide la frecuencia y el ángulo síncrono necesario para calcular las tensiones de las tres fases y así los pulsos generados, por un generador de pulsos discreto, son enviados a los tiristores, para obtener el ángulo  $\alpha$  calculado anteriormente, por el regulador, en la tensiones.

### **3.3.3- Modos de operación en estado estacionario**

El sistema normalmente funciona siendo controlada la  $I_{dc}$  de referencia por el rectificador y la  $V_{dc}$  de referencia o al ángulo gamma por el inversor.

El punto de operación usual en estado estacionario es  $I_{dc}$  de referencia igual a 1 pu y  $V_{dc}$  de referencia igual 1.0 p.u. pero en el caso en que se produzca una falta en el lado de AC del rectificador el control fuerza al sistema a trabajar en condiciones inferiores a las nominales y los controladores funcionan con modo  $\alpha$  mínimo y control de corriente en el rectificador e inversor respectivamente. En caso de una caída de tensión en el sistema de AC del inversor, este estaría forzado a regular el ángulo gamma al mínimo.

Durante una perturbación grave es necesaria una respuesta rápida del sistema para aumentar el margen de conmutación y reducir la probabilidad de un fallo de conmutación. El sistema de protección genera una señal que reduce el límite máximo de  $\alpha$  durante una falta en el sistema de AC.

### **3.3.4.- Comportamiento dinámico del sistema HVDC-LCC**

En este apartado se comprobará el comportamiento dinámico del sistema HVDC-LCC, de 1200 MW y 500 Kv, simulando y observando su respuesta ante las siguientes condiciones:

- Arranque
- Parada
- Cambio de referencia de tensión y corriente
- Falta en el sistema de DC
- Falta en el sistema de AC

### 3.3.4.1.- Arranque

Se cuenta para el arranque con un sistema de control adicional que sirve para controlar el inicio y la parada del sistema entregando una corriente de referencia, para la etapa de continua, en rampa, positiva para el arranque y negativa para la parada, enviados al rectificador e inversor.

Para observar bien la respuesta dinámica del sistema es necesario examinar la tensión, corriente y ángulo  $\alpha$  en el rectificador e inversor.

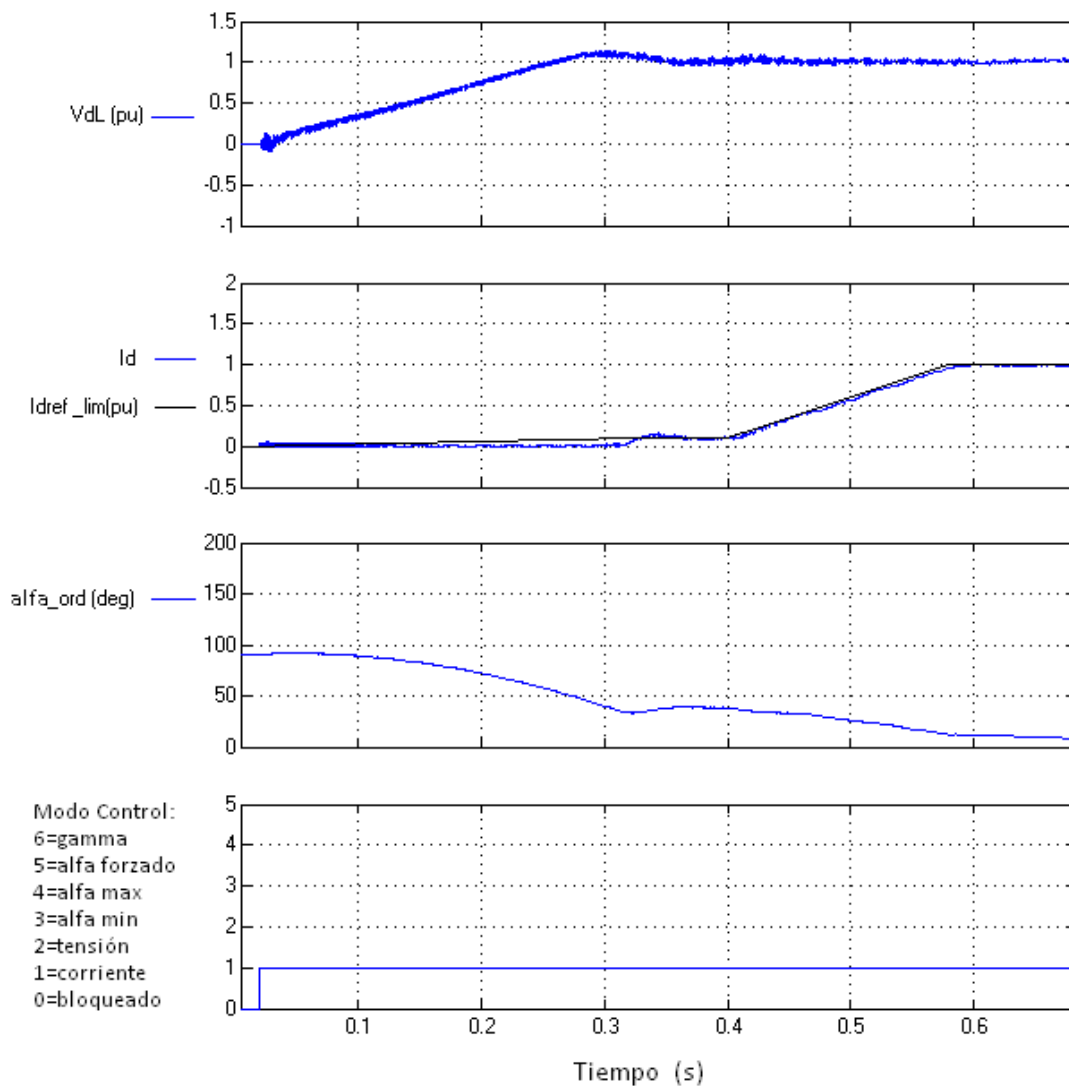
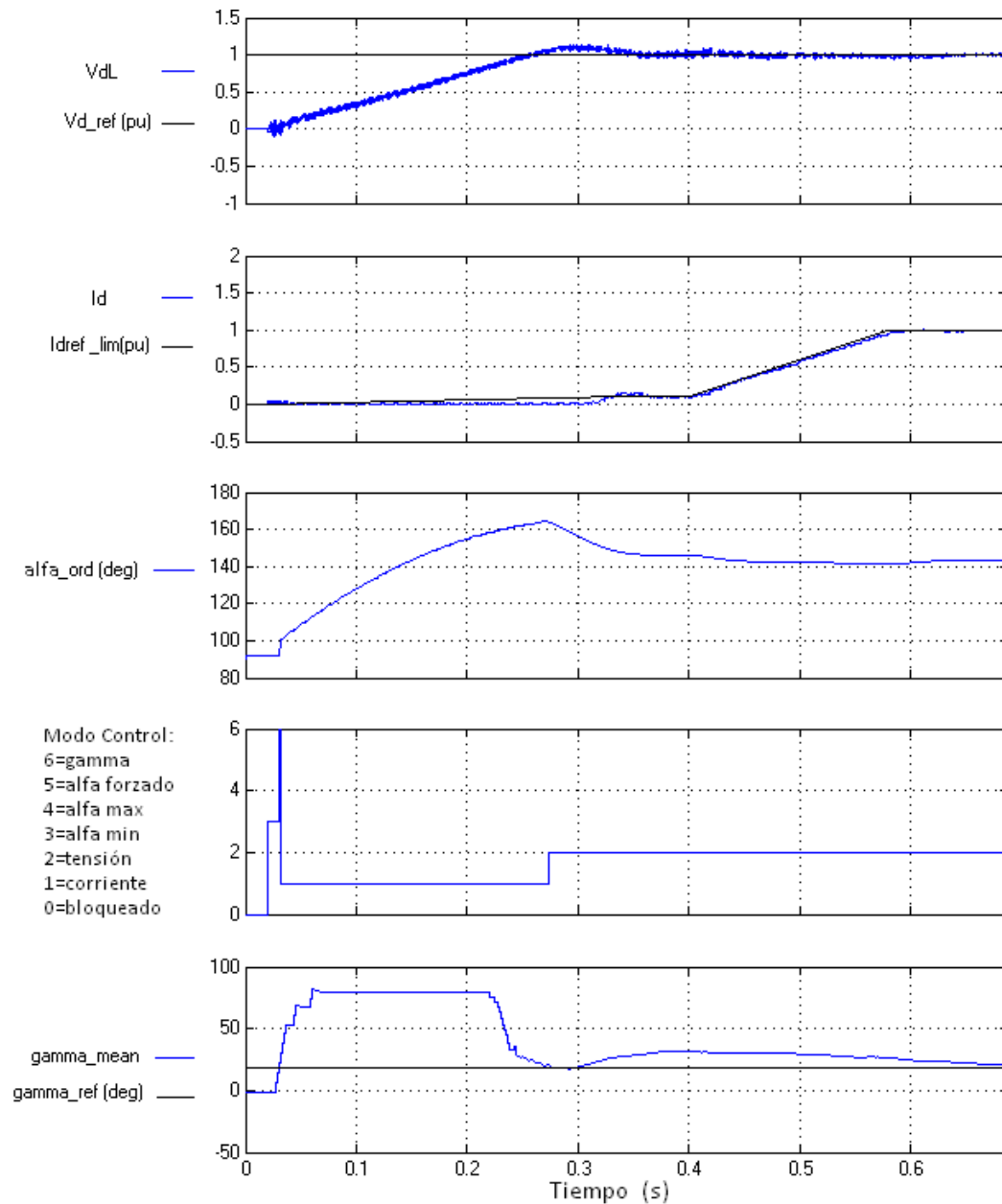


Figura 3.21 - Tensión, corriente y ángulo  $\alpha$  en el rectificador en el arranque del sistema



**Figura 3.22 - Tensión, corriente, ángulo  $\alpha$  y ángulo gamma en el inversor en el arranque del sistema**

El arranque se produce en  $t = 0,2$  s. En ese momento el control de arranque y parada entrega a los controladores una rampa de potencia que alcanza el valor mínimo de corriente, 0,1 p.u. en  $t = 0,3$  s.

Para que aumente la corriente  $I_d$  el nivel de tensión  $V_{dL}$  debe estar cerca de 1.0 p.u. Cuando la tensión se estabiliza en su valor nominal, 0,4 s., el control entrega una rampa de corriente de 5 p.u./s hasta alcanzar  $I_d = 1.0$  p.u., aproximadamente en  $t = 0,6$  s.

En este caso el rectificador controla la corriente y el inversor la tensión, aunque en los primeros instantes del arranque el inversor también funcione controlando la corriente.

### 3.3.4.2- Parada

El proceso de parada es similar al arranque. Desde condiciones estacionarias se disminuye la corriente hasta 0,1 p.u. a tensión nominal, este proceso se efectúa en 0,2 s., y a continuación se disminuye la tensión. En  $t = 1,6$  s. el control de  $\alpha$  forzado en el rectificador hace bajar la corriente hasta cero. El inversor también utiliza este tipo de control y disminuye la tensión a cero aproximadamente en  $t = 1,7$  s. En ese mismo instante los pulsos de los convertidores se bloquean finalizando así el proceso de parada.

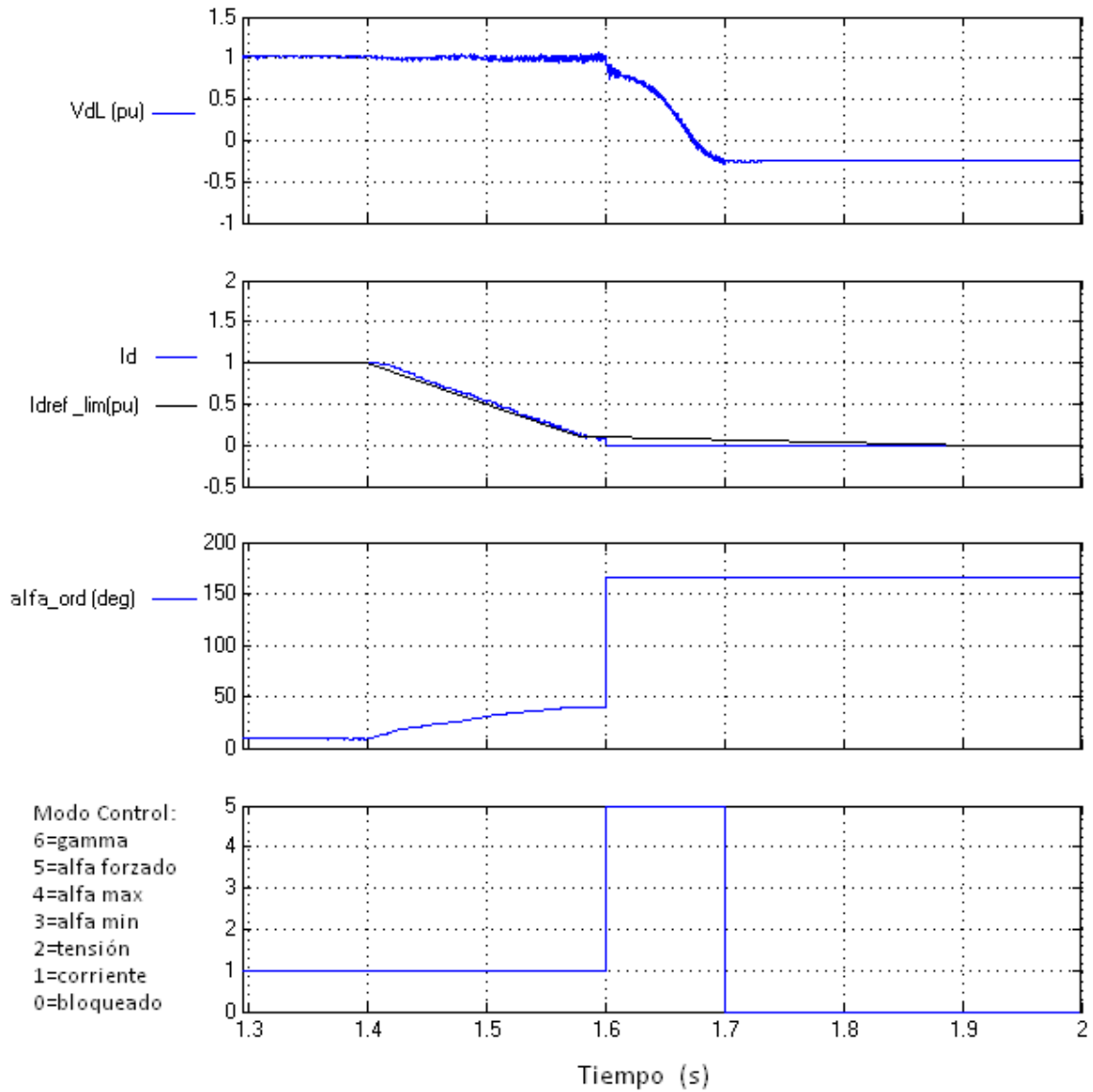
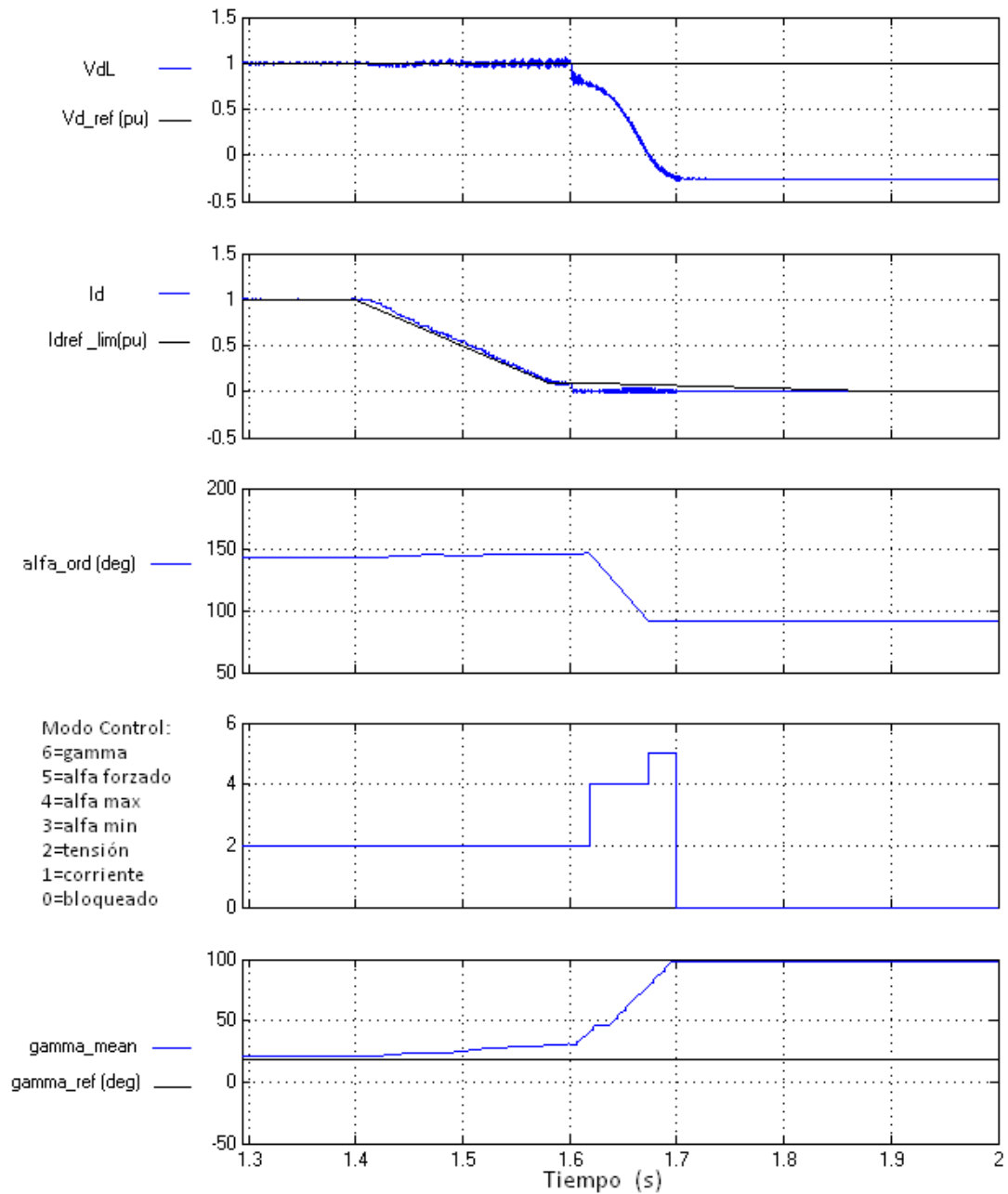


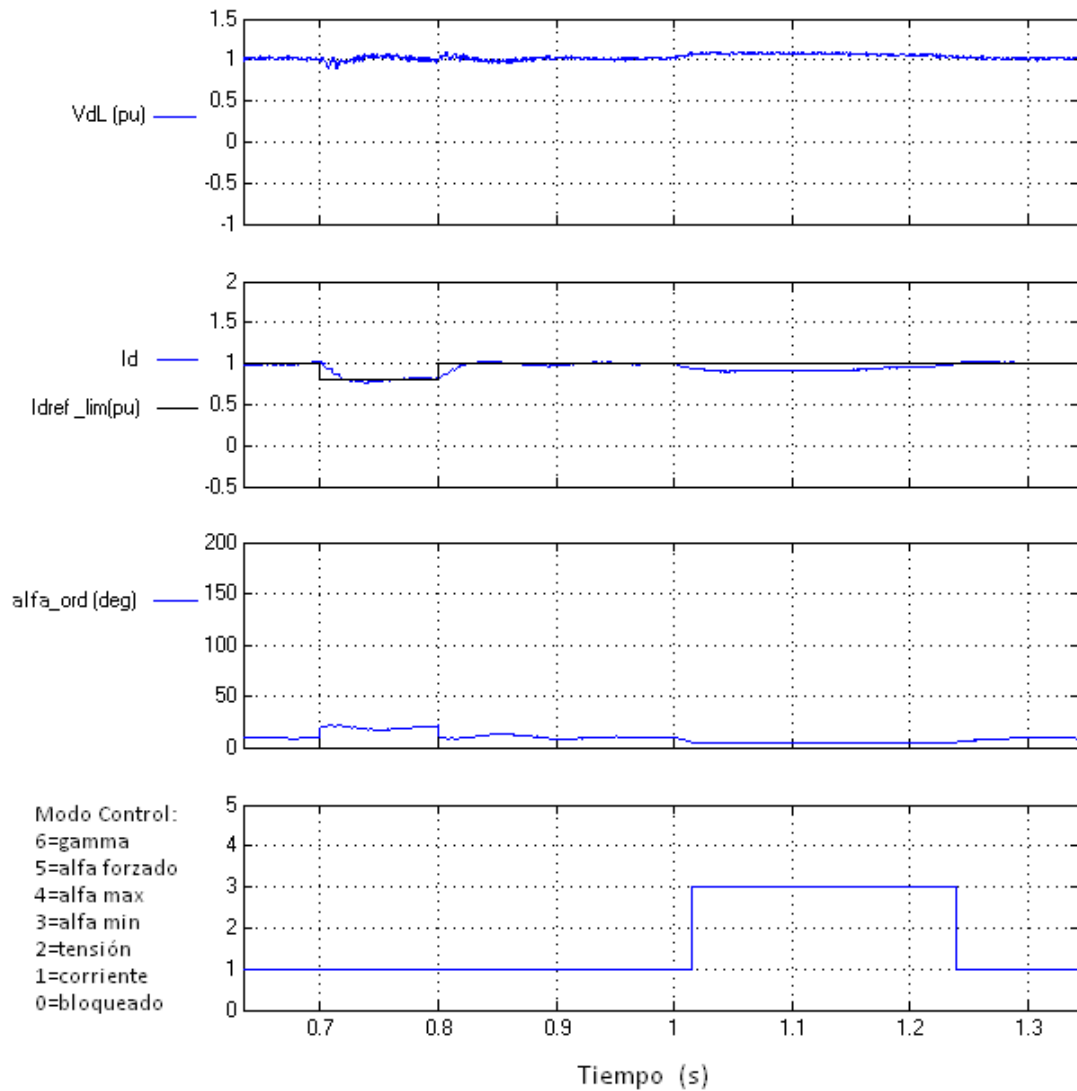
Figura 3.23 - Tensión, corriente y ángulo  $\alpha$  en el rectificador en la parada del sistema



**Figura 3.24 - Tensión, corriente, ángulo  $\alpha$  y ángulo gamma en el inversor en la parada del sistema**

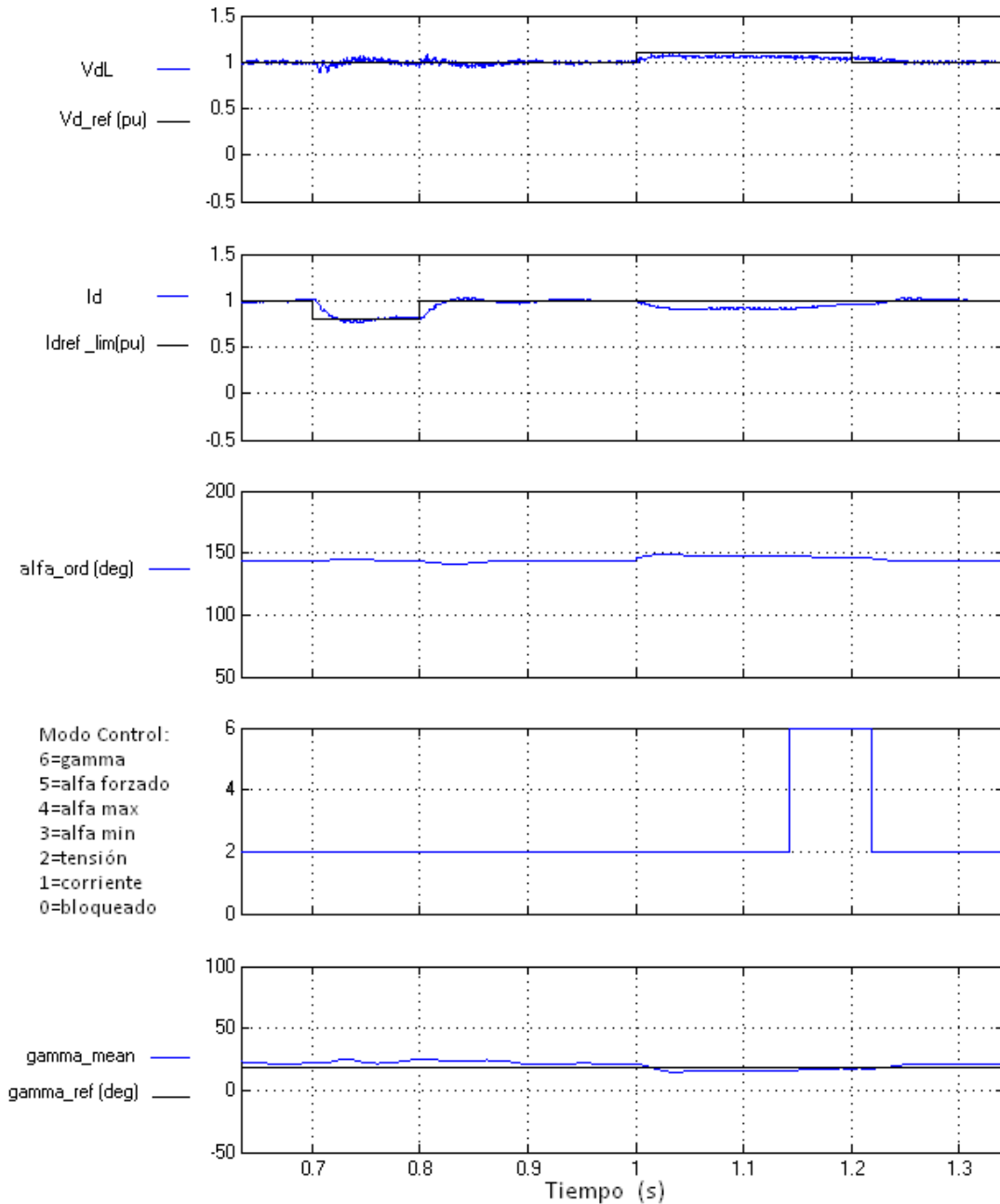
### 3.3.4.3.- Cambio de referencia de tensión y corriente

A continuación se observa la respuesta del sistema ante un cambio de referencia de tipo escalón de corriente en DC igual a -0,2 p.u. El sistema llega a estabilizarse hasta el nuevo valor de la corriente de referencia en 0,02 s. en ambos casos, escalón de bajada y de subida de la corriente.



**Figura 3.25 - Tensión, corriente y ángulo  $\alpha$  en el rectificador en el cambio de referencia de corriente y de tensión**





**Figura 3.26 - Tensión, corriente, ángulo  $\alpha$  y ángulo gamma en el inversor en el cambio de referencia de corriente y de tensión**

En  $t=1$  s. se produce un cambio de referencia de tipo escalón de tensión de valor 0,1 p.u. durante 0,2 s. Se observa como el sistema responde aumentando la tensión hasta su límite ya que apenas alcanza la tensión de referencia 1.1 p.u. Para aumentar la tensión el rectificador pasa a su modo de control de  $\alpha$  mínimo, es decir, su mayor tensión en la etapa DC, y el inversor pasa a su modo de control de Gamma ( $\gamma$ ) unos instantes. Al volver la tensión de referencia a 1.0 p.u., el modo de control vuelve a su estado anterior al escalón.

### 3.3.4.4- Falta en el sistema DC

Arrancado el sistema, se produce una falta en el sistema DC en el instante  $t=0,7$  s.

Se observa como la tensión de continua UdL en el rectificador cae hasta 0 y la corriente alcanza 2,2 p.u. La caída de tensión es detectada por el VDCOL (Voltage Dependent Orden Limiter). Este entrega una corriente de referencia de 0,3 p.u. en el rectificador. El sistema de protección después de detectar el bajo nivel de tensión en DC fuerza el disparo en un ángulo  $\alpha$  máximo ( $166^\circ$ ) luego su operación es similar a la del inversor. Por unos instantes la tensión es negativa devolviendo parte de la energía almacenada al sistema de AC y provocando una rápida extinción de la corriente de falta. En  $t = 0,96$  s. deja de actuar el control de  $\alpha$  forzado y las condiciones nominales se restablecen aproximadamente en 0,5 s.

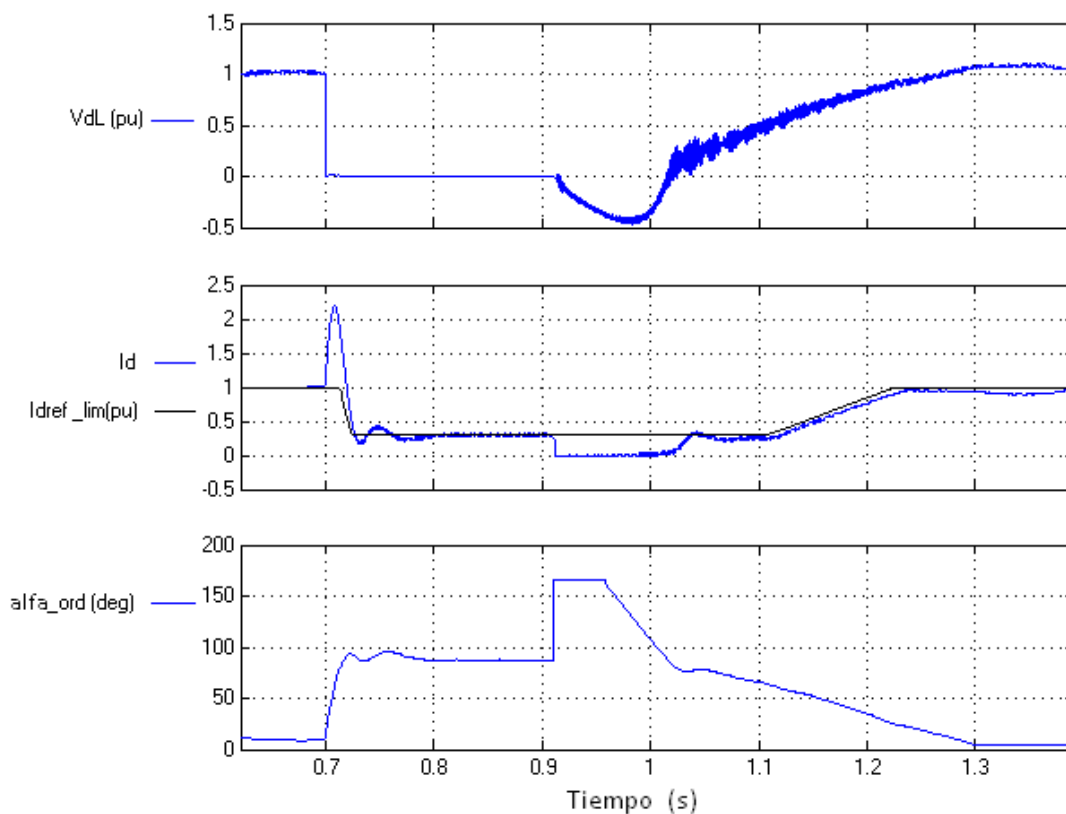
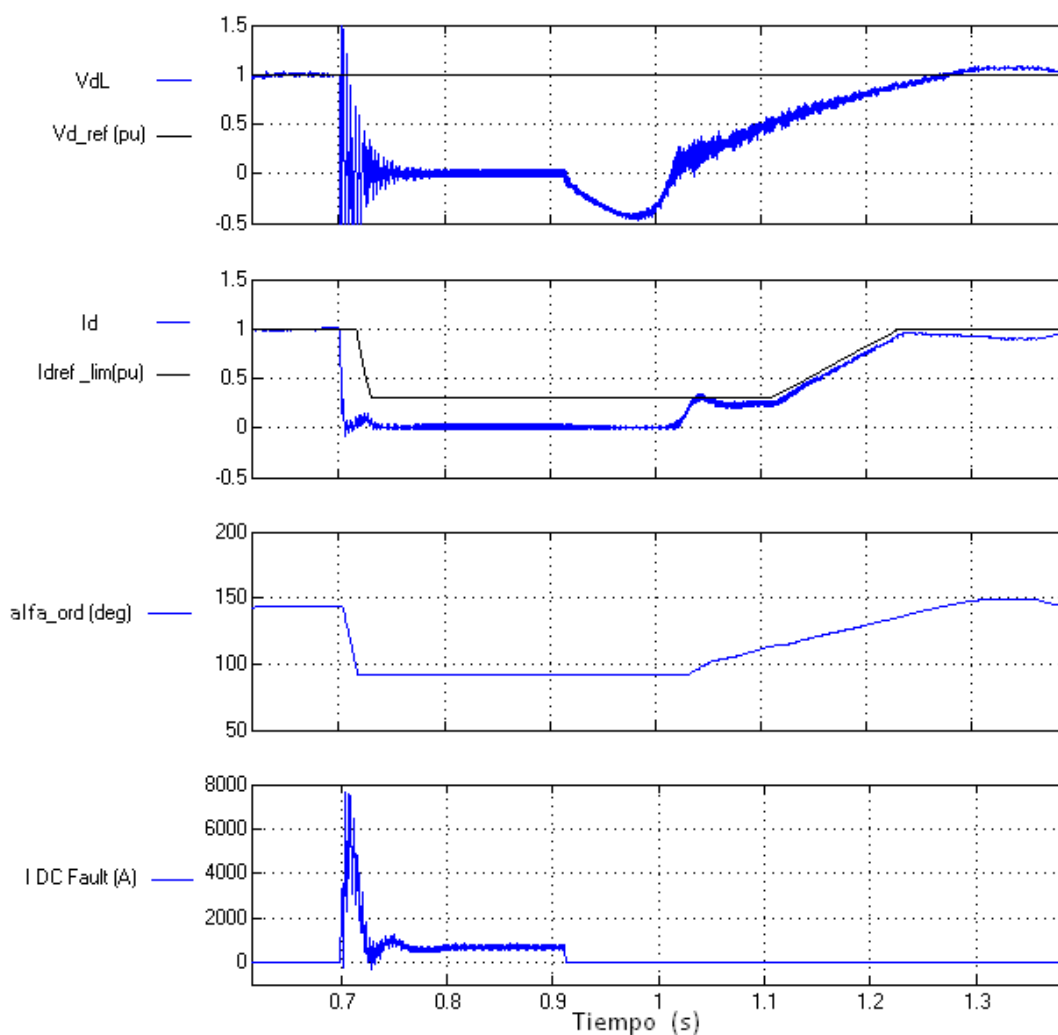


Figura 3.27 - Tensión, corriente y ángulo  $\alpha$  en el rectificador durante una falta en el sistema DC.



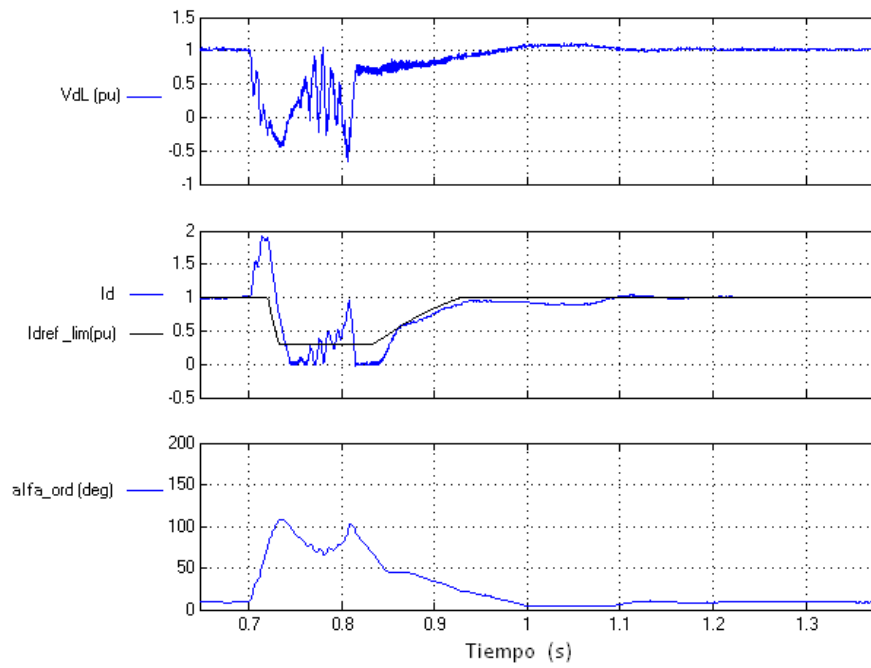
**Figura 3.28 - Tensión, corriente, ángulo  $\alpha$  en el inversor y corriente de falta durante una falta en el sistema DC.**

### 3.3.4.5.- Falta en el sistema de AC

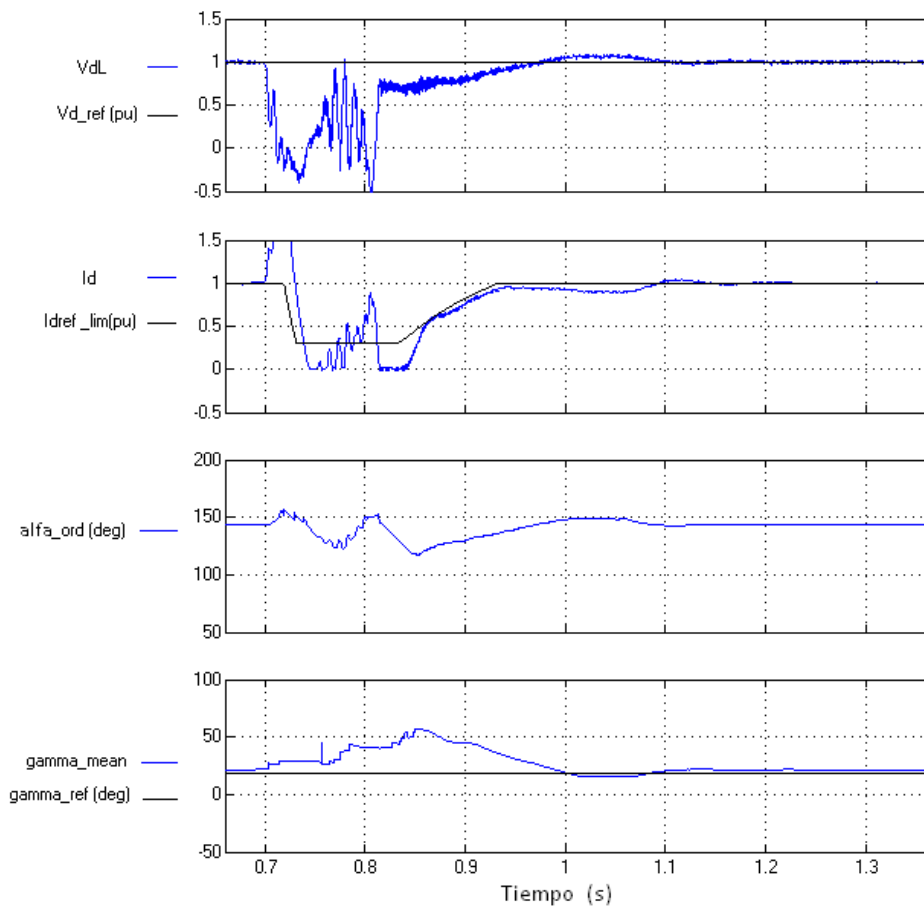
La falta es simulada en el sistema de AC donde se sitúa el inversor y su duración es 0,1 s. Se observa en la tensión UdL oscilaciones de 120 HZ durante la falta. Debido a la falta se produce un fallo en la conmutación al inicio de esta, lo que hace que la corriente Id llegue a 2 p.u. Este fallo de conmutación sucede cuando un tiristor intenta conducir la corriente pero cuando la tensión todavía no ha invertido su polaridad. Esto hace que la tensión UdL se haga cero, lo que incrementa la corriente Id.

Cuando acaba la falta el VDCOL reduce la corriente de referencia en DC a 0,3 p.u. hasta que la tensión aumenta y entrega una rampa de corriente hasta restaurar las condiciones nominales aproximadamente en 0,35 s. desde el final de la falta.

El sistema de protección del inversor detecta la falta y bloquea las protecciones que actúan con una falta en la etapa de DC, para que no actúen cuando se detecte bajo el nivel de tensión en DC. Además aumenta el margen de conmutación durante y después de la falta.



**Figura 3.29 - Tensión, corriente y ángulo  $\alpha$  en el rectificador durante una falta en el sistema AC.**



**Figura 3.30 - Tensión, corriente, ángulo  $\alpha$  y ángulo  $\gamma$  en el inversor durante una falta en el sistema de AC**

# Capítulo 4

## El transformador de continua

### 4.1- Introducción

Los transformadores de continua a estudiar en este capítulo son los que tuvieran la posibilidad de trabajar en HVDC, por lo tanto nos referimos a convertidores DC-DC del orden de MW y KV como condiciones nominales. Dadas sus características los convertidores convencionales buck y boost no pueden trabajar en estos rangos de potencia tan altos.

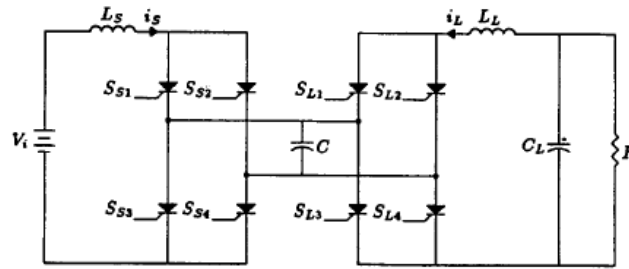
Anteriormente el uso de convertidores DC-DC para HVDC no han sido muy usados por la poca demanda y por la falta de tecnología necesaria pero en la actualidad la necesidad de implantar los sistemas HVDC ha aumentado considerablemente. También han crecido las fuentes de energía que proporcionan potencia en DC con niveles de MW, como la energía fotovoltaica, pilas de combustible y muchas otras fuentes de energía de velocidad variable pueden ser consideradas fuentes de continua como los generadores eólicos de imanes permanentes o generadores hidroeléctricos pequeños. Dado que muchas de estas fuentes tienen niveles de tensión bajos ha sido difícil integrarlos en el sistema eléctrico. Por lo tanto el crecimiento de la demanda de los sistemas HVDC y fuentes de potencia en DC está aumentando la necesidad de los transformadores en DC.

A pesar de la posible conexión multiterminal de las líneas VSC la mayoría de ellas están conectadas entre dos terminales. Los transformadores de DC de altos niveles de potencia permitirían aprovechar más las líneas HVDC mediante la conexión de TAPs y mejorar el desarrollo de las conexiones multiterminal. También es favorable el uso de estos transformadores para la transmisión submarina dado que requiere un aumento de tensión de altos niveles de potencia. Este transformador puede favorecer el desarrollo de los FACTS (Flexible AC Transmission Systems) dada la posibilidad de conexión de un amplio rango de fuentes de DC.

Los convertidores boost han alcanzado una ganancia entre 2 y 4 y el aumento de potencia es muy difícil por el diodo de salida. Se han estudiado convertidores flyback y forward de altas potencias pero tienen limitaciones a la hora de aumentar su rango, esto es muy difícil dado que estos convertidores utilizan MOSFET para las conmutaciones de alta frecuencia. El máximo rango estudiado es un convertidor forward de 100KW y 14KV.

Existen también otro tipo de convertidores de conmutación de condensadores que es una buena opción para aumentar la tensión sin necesidad del uso de un transformador de AC intermedio pero tiene algunas desventajas. A pesar de lograr grandes ganancias de tensión y

operar con tiristores, son necesarios mayor cantidad de interruptores lo que aumenta las pérdidas, su complejidad y la pobre calidad de la energía.

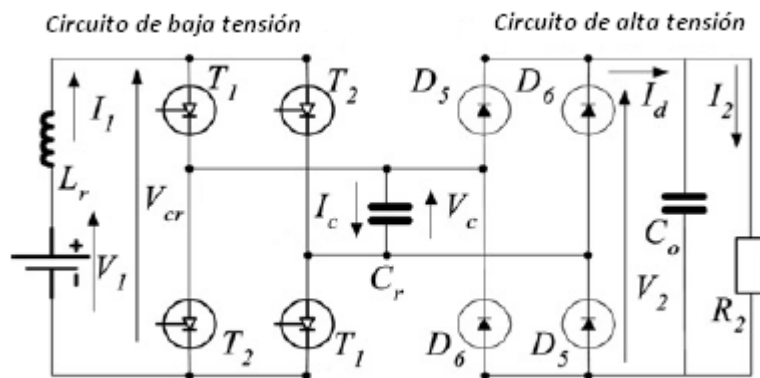


**Figura 4.1 - topología de convertidor de conmutación de condensadores**

Cabe destacar que los convertidores que se describirán en ese capítulo son del tipo resonante, se describirán dos tipos, unidireccionales y bidireccionales, ambos con rango de potencia de MW. Puesto que el unidireccional solo puede operar aumentando la tensión y el bidireccional opera aumentándola o disminuyéndola este último tendrá más aplicaciones en HVDC.

## 4.2.- Convertidor DC-DC unidireccional

La topología del convertidor es la observada en la figura 4.2. Esta formada por 4 tiristores y una inductancia en el lado de baja tensión,  $L_1$ , 4 diodos en el lado de alta tensión y un condensador común a ambas. La inductancia en el lado de alta tensión,  $L_2$ , no es necesaria para el convertidor pero reduce en gran medida los armónicos producidos a la salida y las corrientes derivativas en los diodos.



**Figura 4.2 - Convertidor DC-DC unidireccional**

Mediante los pulsos se cambian los tiristores en conducción,  $T_1$  o  $T_2$ , y por lo tanto la polaridad del condensador. Esta topología forma un circuito resonante  $L_1$ - $C$  que aumenta la tensión, luego se ha de elegir cuidadosamente los valores de la inductancia  $L_1$  y el condensador.

La frecuencia de conmutación de los tiristores es  $f_s = 1/T_s$ , luego la máxima frecuencia de trabajo es  $f_{s_{max}} = 1/2T_{off}$ , (4.1) siendo  $T_{off}$  el tiempo de apagado de los tiristores.

Este convertidor puede funcionar en dos modos: continuo, en el que la corriente transmitida no alcanza el valor nulo entre ciclos, o discontinuo, en el que alcanza el valor nulo. La ecuación que rige el funcionamiento, en ambos modos, del convertidor es la siguiente:

$$\frac{I_2(V_2 - V_1)}{V_1 V_2} = 2C_r f_s \quad (4.2)$$

En ella puede deducirse el valor de  $C_r$ , conocidos los valores de  $f_s$  y los niveles de potencia y tensiones nominales, es decir,  $I_2$ ,  $V_2$  y  $V_1$  siendo  $V_2 > V_1$ .

Conociendo el valor del condensador común a las dos tensiones puede calcularse mediante la siguiente ecuación el valor de la inductancia  $L_1$  óptima, la cual produce que el modo de funcionamiento este en el limite entre el modo continuo y discontinuo lo cual beneficia las conmutaciones de los tiristores y por tanto minimiza sus pérdidas.

$$L_{1r} = 1/\pi^2 f_s^2 C_r \quad (4.3)$$

En este tipo de convertidor pueden obtenerse unas grandes ganancias de tensión ( $V_2/V_1$ ), lo cual puede reducir la ecuación (4.2) de la siguiente forma:

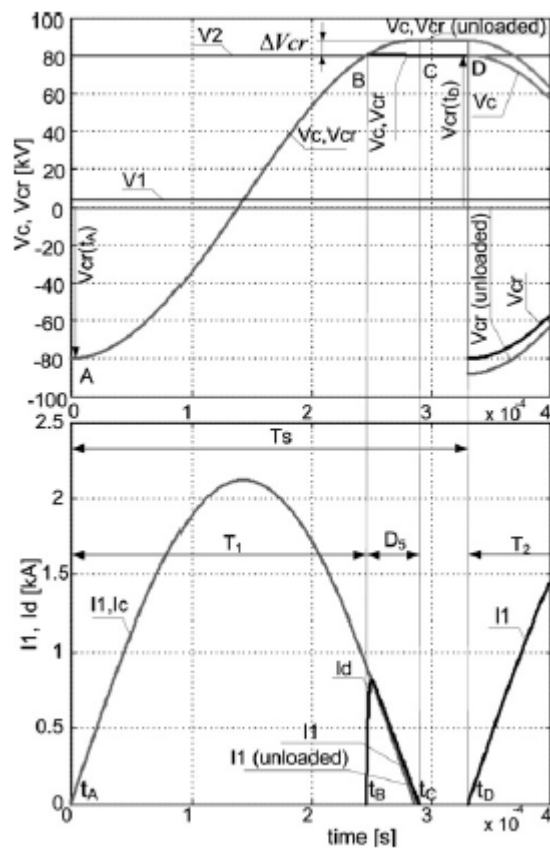
$$\frac{I_2}{V_1} = 2C_r f_s \quad (4.4)$$

Las principales ventajas de este convertidor son la utilización de tiristores para las conmutaciones que hace posible el alto rango de potencia y que en modo discontinuo todas las conmutaciones se producen con corriente igual a cero lo cual minimiza las pérdidas en los semiconductores reduciéndolas a sus pérdidas por conducción.

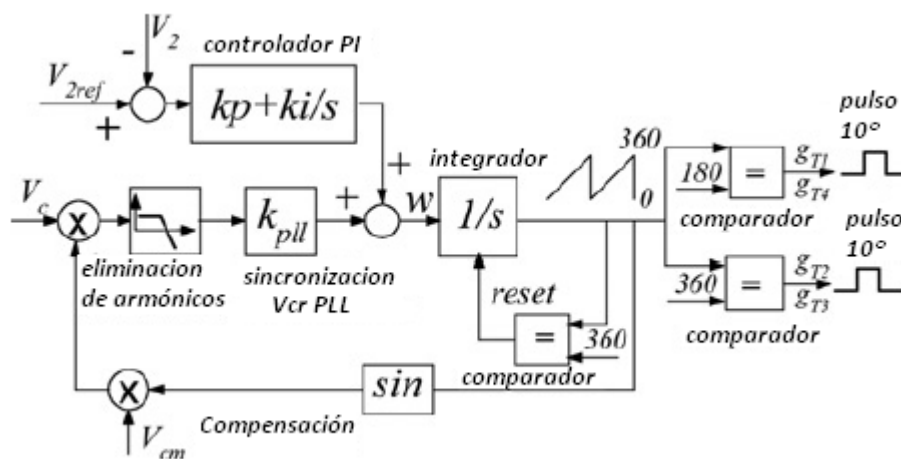
La figura 4.3 muestran las tensiones y corrientes en el convertidor cuando opera en modo discontinuo y estacionario asumiendo  $V_1$  y  $V_2$  constantes, lo cual se consigue con un condensador  $C_o$  de alto valor.

En el intervalo AB la tensión del condensador aumenta cargándose de energía. Cuando la tensión del condensador llega al valor de  $V_2$  los diodos conducen entregando potencia a la carga durante el intervalo BC. En el instante C la corriente por los tiristores se hace cero, dicho instante define si el convertidor opera en modo continuo o discontinuo, En el instante D los tiristores alternativos son disparados invirtiendo la tensión en el condensador empezando otra vez el ciclo.

Un posible controlador para este convertidor es el mostrado en la figura 4.4 el cual utiliza un control feedback combinado con un PI para el control de  $V_2$ . Dependiendo de su aplicación este control puede aplicarse a otras variables como  $I_1$  o  $I_2$ . Se utiliza un PLL (Phase Locked Loop) para la sincronización de los pulsos de disparo y la tensión en el condensador, esto es importante cuando se opera a bajas frecuencias, siendo este el caso del arranque. La frecuencia de disparo es controlada de tal manera que el ciclo de trabajo sea del 50%.



**Figura 4.3 - Tensiones y corrientes en el convertidor unidireccional**



**Figura 4.4 - Sistema de control del convertidor unidireccional.**



### 4.3.-Convertidor bidireccional con cambio de tensión.

El convertidor bidireccional se compone por un circuito de baja tensión y otro de alta tensión conectados mediante dos condensadores conectados a tierra. El circuito de baja tensión se compone de una inductancia resonante  $L_1$  y un puente de cuatro tiristores que conducen en secuencia  $T_1$  y  $T_2$ . En el lado de alta tensión se encuentra un puente de tiristores bidireccional y una inductancia resonante  $L_2$ . La topología mostrada en la figura 4.5 es muy conveniente para sistemas VSC, LCC y en también para configuraciones bipolares de HVDC.

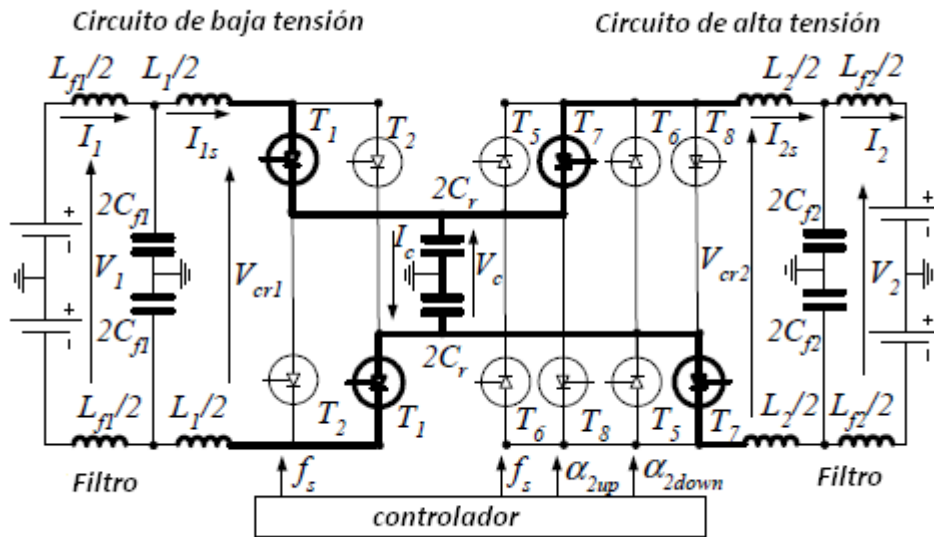


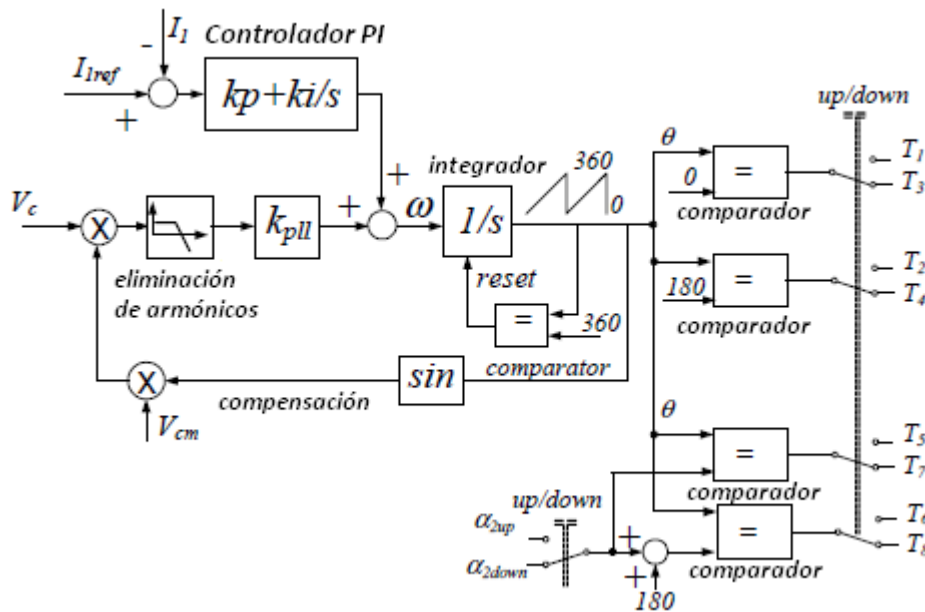
Figura 4.5 - Convertidor bidireccional con cambio de tensión.

Los elementos del circuito de baja tensión son seleccionados de igual manera que en el convertidor unidireccional, se modo que la frecuencia de operación será acorde a (4.1) para ambas tensiones.

El circuito de alta tensión opera como un convertidor resonante mediante una resonancia  $L_1 C_r L_2$ . En el modo elevador este convertidor funciona igual que el unidireccional. Los tiristores  $T_5$  y  $T_6$  están abiertos todo el tiempo, actuando como diodos y la inductancia  $L_2$  no tiene apenas importancia para la operación, aunque afecte a las corrientes derivativas y al pico de tensión del condensador. Los filtros mostrados en la figura no son esenciales y dependerán de la calidad de la energía.

Para cambiar la dirección de transmisión de potencia se invierte la dirección de  $I_2$  y la tensión  $V_1$ . Ambos modos de funcionamiento, elevador y reductor, pueden servir como interconexión con líneas de HVDC a la salida de la etapa rectificadora y a la entrada de la etapa inversora respectivamente.

El control de este convertidor es muy parecido al unidireccional, se basa en la sincronización de los pulsos de disparo y la tensión del condensador utilizando un PLL. Un control PI combinado con un feedback regula  $I_1$ , aunque puede aplicarse a otras variables.



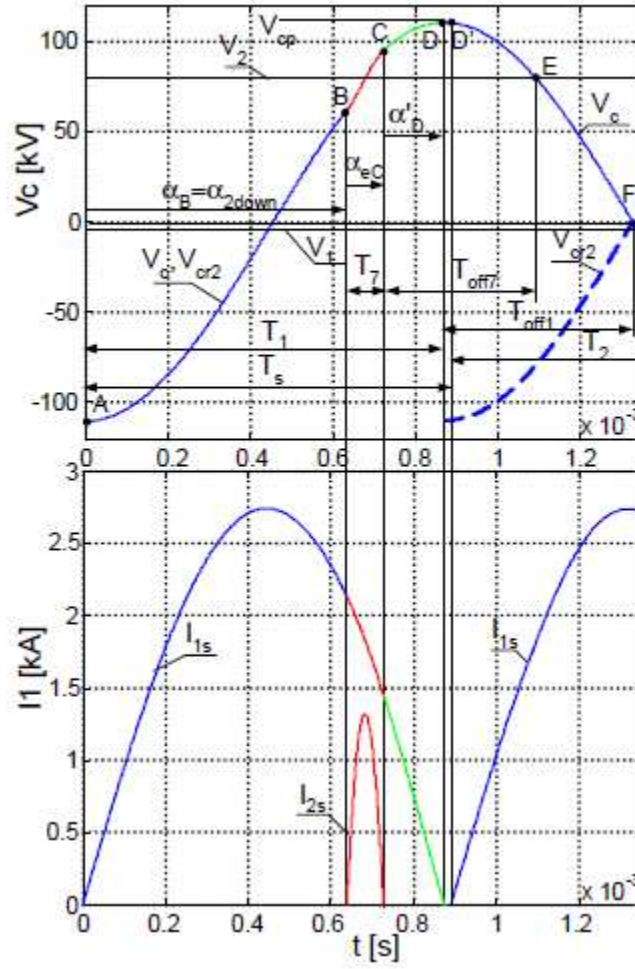
**Figura 4.6 - Control aplicado a convertidor bidireccional**

Funcionando en modo elevador los tiristores  $T_5$  y  $T_6$  funcionando como diodos y en modo reductor están apagados, siendo  $T_7$  y  $T_8$  los encargados de controlar la tensión en el condensador  $V_c$ . Se muestra en la figura 4.7 las formas de onda en un ciclo operando como reductor.

La inductancia  $L_2$  crea una resonancia  $L_1 C_r L_2$  que hace posible un apagado de los tiristores con corriente igual a cero, lo cual es una gran ventaja respecto a los convertidores buck y boost.

Operando como reductor las dos variables fundamentales para su funcionamiento son  $L_2$  y  $\alpha_B$ . Si el instante  $\alpha_B$  mostrado en la figura 4.7 se produce demasiado pronto la tensión  $V_c$  sería más baja y esto provocaría un aumento de la energía transmitida por la inductancia y derivaría en una mayor corriente derivativa  $dI_2/dt$  y un alto pico de tensión en el condensador. Si el instante  $\alpha_B$  se produce demasiado tarde se reducirá el margen de tiempo máximo de apagado  $T_{off7}$  de los tiristores  $T_7$  y  $T_8$ , y debe cumplirse  $T_{off7} > T_{off}$ , siendo  $T_{off}$  el tiempo de apagado de los tiristores del lado de alta tensión del convertidor

Una inductancia  $L_2$  pequeña implica grandes corrientes  $dI_2/dt$  y picos de corriente  $I_{2s}$  en el circuito de alta tensión. La derivada de la corriente no puede superar los límites permitidos y los altos picos generan grandes armónicos. En cambio una inductancia  $L_2$  demasiado grande provocará largos intervalos de conducción de  $T_7$  implicando un reducido tiempo de apagado y alta tensión de pico en el condensador,  $V_{cp}$ .



**Figura 4.7 - Tensiones y corrientes en el convertidor bidireccional como reductor de tensión**

Las ecuaciones dinámicas aplicadas en el intervalo AB y CD, en los que sólo opera el circuito de baja tensión, son las siguientes:

$$L_2 \frac{dI_1}{dt} = V_1 - V_2 \quad (4.5)$$

$$C_2 \frac{dV_c}{dt} = I_1 \quad (4.6)$$

En el intervalo BC ambos circuitos conducen y las ecuaciones dinámicas aplicadas son:

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} = V_1 - V_c \quad (4.7)$$

$$C_2 \frac{dV_c}{dt} = I_1 - I_2 \quad (4.8)$$

$$L_2 \frac{dI_1}{dt} = V_c - V_2 \quad (4.9)$$

A partir de estas ecuaciones pueden calcularse las corrientes derivativas, el pico de tensión en el condensador y el ángulo  $\alpha_B$ , mediante un complejo sistema de ecuaciones no lineales que es posible resolver por métodos iterativos, a partir de un valor de  $L_2$  dado. Por lo tanto se ha de comprobar como varían estas variables en función de  $L_2$  para elegir su valor adecuado, en el que las corrientes derivativas y el pico de tensión sean relativamente bajos pero respetando el valor de  $\alpha_B$  tal que se cumpla la condición de funcionamiento respecto al tiempo de apagado de los tiristores.

$$T_{off7} = t_E - t_C > T_{off}$$

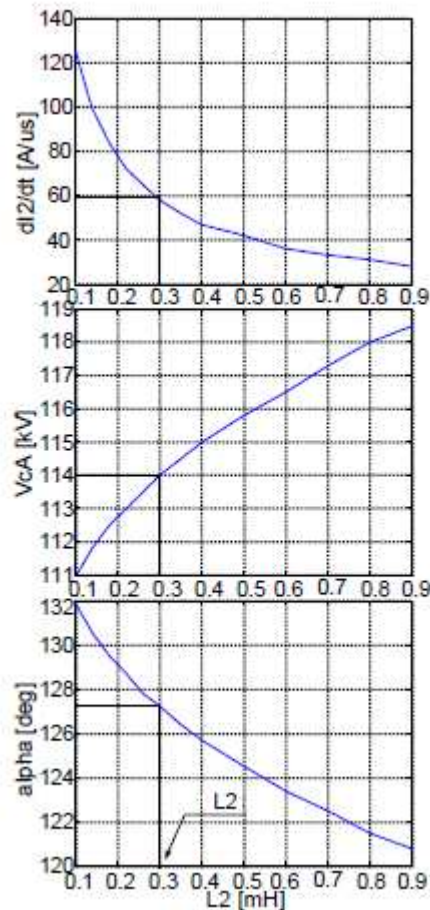


Figura 4.8 - Variación de  $di_2/dt$ ,  $V_c$  y  $\alpha_B$  en función de  $L_2$ .

#### 4.4.- Convertidor bidireccional con cambio de corriente

En algunas aplicaciones no es posible cambiar la polaridad de las tensiones  $V_1$  y  $V_2$ , para cambiar en dichas situaciones la dirección de transmisión de potencia es necesaria cambiar la polaridad de las corrientes  $I_1$  e  $I_2$ . Para ello será oportuno colocar en el lado de baja tensión cuatro tiristores más,  $T_3$  y  $T_4$ , funcionando estos cuando se invierta la corriente  $I_1$ .

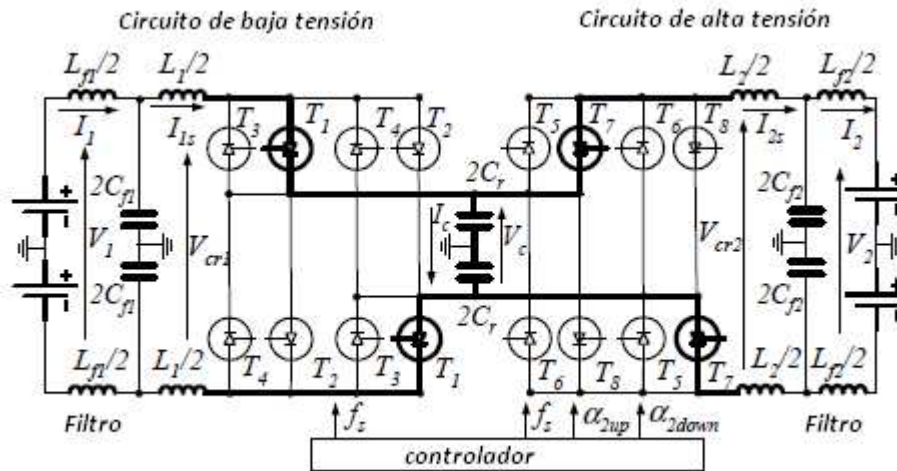


Figura 4.9 - Convertidor bidireccional con cambio de corriente

El control de este convertidor es el mismo que para el convertidor bidireccional con cambio de tensión que se muestra en la figura 4.6

Este convertidor por tanto puede operar en 4 cuadrantes ya que le puede cambiar la polaridad de la tensión y de la corriente.

#### 4.5- Conexión de TAPs

Un TAP está definido como una conexión en serie o en paralelo a una línea principal de HVDC. Las diferencias entre un TAP y una conexión multiterminal es que el TAP se controla independientemente del sistema HVDC y la potencia de operación es mucho menor que la del sistema, cerca del 5% del sistema HVDC al que se conecte.

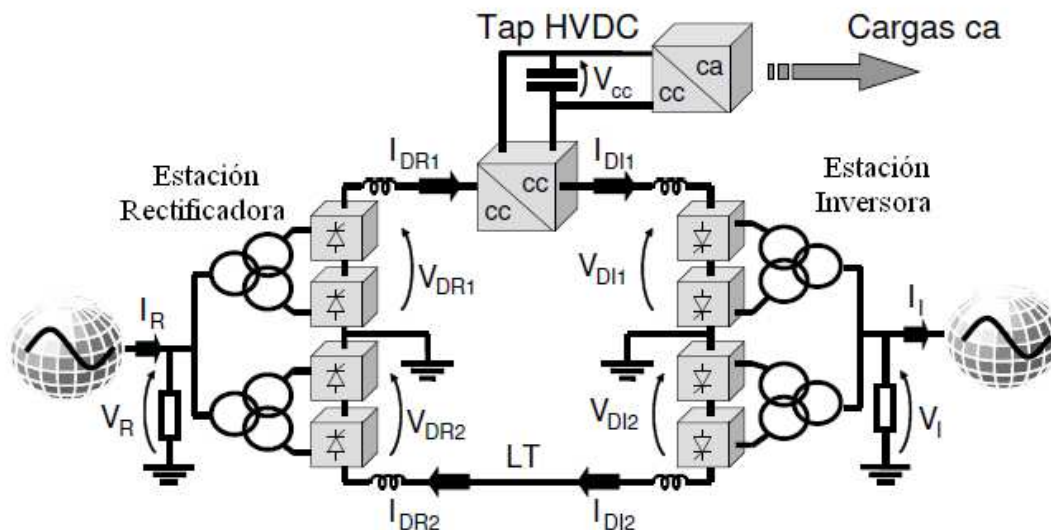


Figura 4.10 – Esquema simplificado de la conexión de un TAP.

Hay varias topologías posibles a la hora de conectar un TAP a una línea HVDC. Una de ellas es la mostrada en la figura 4.11 que realiza una conversión DC/AC mediante tiristores, diodos y

un condensador. A continuación con un transformador se baja el nivel de tensión y se rectifica con un puente de diodos para obtener corriente continua por la línea de transporte.

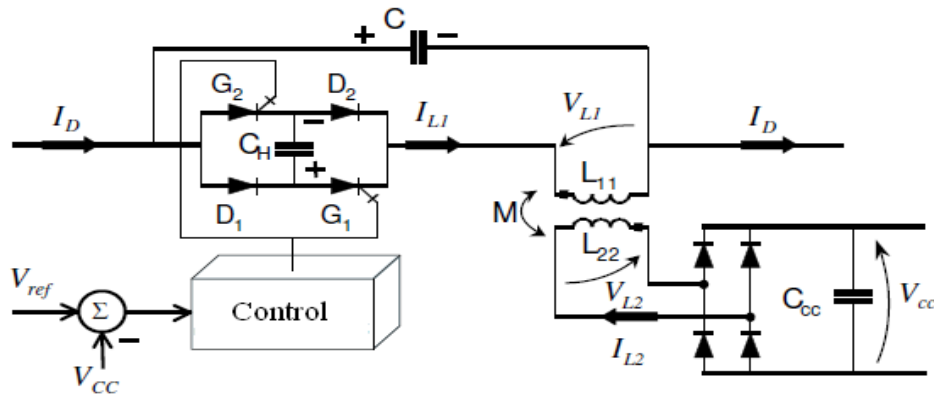


Figura 4.11- Esquema eléctrico de un TAP unidireccional

Otra opción es aplicar una conversión DC/AC de igual manera que la topología anterior y mediante un transformador adecuar la tensión para su posterior transporte o consumo en AC.

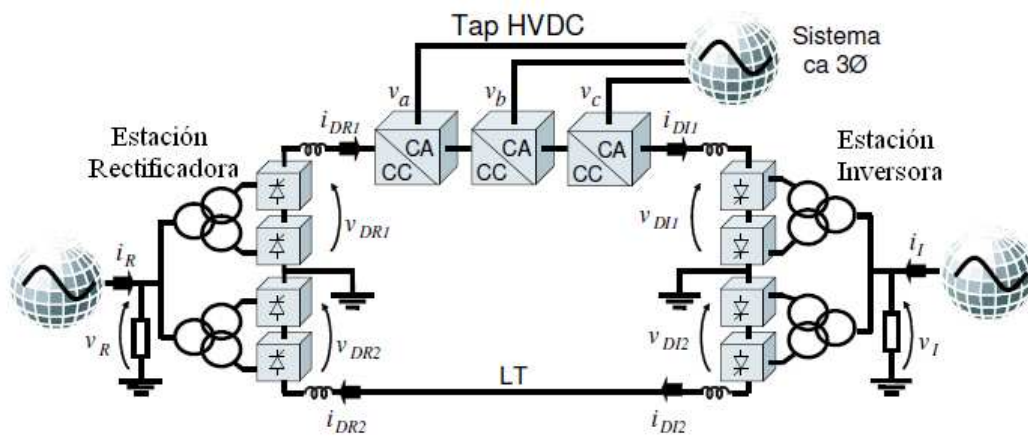


Figura 4.12- TAP bidireccional con convertidor DC/AC

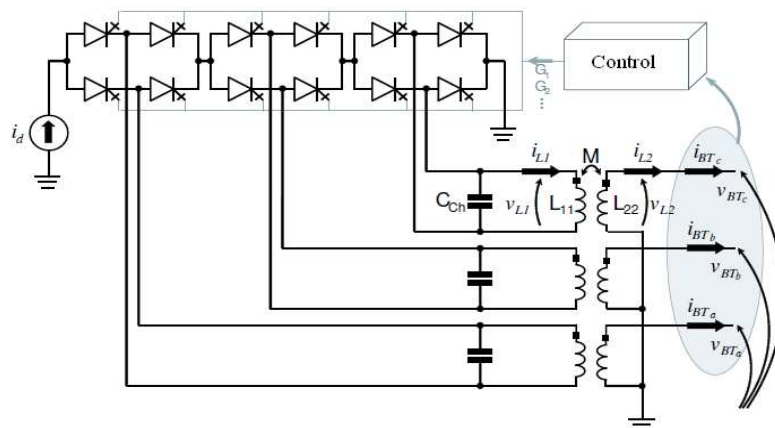


Figura 4.13- TAP bidireccional con convertidor DC/AC

Sin embargo la principal ventaja, en lo referente a conexión de TAPs, de los convertidores DC/DC detallados en los apartados 4.2, 4.3 y 4.4 respecto a los mostrados en las figuras 4.11 y 4.13 es que no es necesaria la instalación de transformadores que operen a muy altos niveles de tensión. Por lo tanto, pueden ser una mejor opción a la hora de realizar conexiones de TAPs a los sistemas HVDC, especialmente en el aspecto económico.

#### **4.5- Conclusión**

Los convertidores resonantes de DC-DC descritos, tanto el unidireccional como el bidireccional, pueden operar con ganancias de tensión muy grandes y con niveles de potencia del orden de MW y aunque no estén en la actualidad muy extendidos puede tener multitud de aplicaciones para los sistemas HVDC y contribuir al desarrollo de las conexiones multiterminal y TAPs.

# Capítulo 5

## Repercusión de los sistemas HVDC en la calidad de la energía eléctrica

### 5.1- Introducción

La calidad de la energía en un sistema eléctrico se refiere tanto a calidad de las ondas de tensión y corriente como a su fiabilidad y continuidad en el suministro eléctrico. Los sistemas HVDC utilizan filtros en ambas etapas de las estaciones para adecuar la forma de onda de la tensión y de la corriente, pero su contribución a la calidad eléctrica se centra en la fiabilidad y continuidad del suministro. Estos factores toman cada día más importancia dado el alto desarrollo de los equipos de los consumidores haciéndolos más complejos y sensibles ante perturbaciones, aumentando las posibles pérdidas económicas en caso de grandes perturbaciones, especialmente en el sector industrial.

La mayoría de los sistemas utilizados actualmente para el transporte de energía eléctrica desde los centros de generación hasta los de consumo son HVAC, ya sean en sistemas mallados o radiales, pero en estos sistemas pueden originarse inestabilidades que son difíciles de controlar como perturbaciones en cascada, aumento o disminución brusca de carga, fallo de un generador, sobrecarga de las redes, etc.

Los sistemas HVDC, en especial los VSC, pueden controlar muchas de las perturbaciones que causan la inestabilidad de la red y son muy útiles en situaciones en las que los sistemas HVAC tienen mayores problemas.

### 5.2- Estabilidad en la red eléctrica

Para que un sistema eléctrico sea estable debe cumplir la condición de que sus variables eléctricas permanezcan dentro de un rango aceptable de operación o de los valores admisibles del sistema. También debe cumplir la condición de, operando de manera estable, si el sistema es perturbado, este sea capaz de volver a un estado operativo donde las variables del sistema estén dentro del rango operativo admisible del sistema, en un tiempo aceptable.





Figura 5.1 - Esquema de tipos de estabilidad en sistemas eléctricos

### 5.2.1- Inestabilidad angular

La estabilidad angular es la habilidad de las máquinas síncronas de un sistema eléctrico de mantenerse en sincronismo. Este tipo de inestabilidad puede ser de dos tipos:

- Inestabilidad de pequeña señal: se produce cuando el sistema no puede mantenerse en sincronismo ante pequeñas perturbaciones como variaciones de carga o generación.
- Inestabilidad angular transitoria: se produce cuando los generadores no permanecen en sincronismo después de una gran perturbación en ellos como faltas trifásicas.

### 5.2.2- Inestabilidad de frecuencia

Este tipo de inestabilidad es resultado de una gran diferencia entre carga y generación debido a sus cambios dinámicos. En caso de sobrefrecuencia los generadores pueden ser desconectados y en caso de una caída de la frecuencia se puede controlar un deslastre de carga para estabilizar el sistema.

### 5.2.3- Inestabilidad de tensión

Esta inestabilidad es producida por la incapacidad del sistema por mantener la tensión de todas las barras dentro de los valores admisibles en operación estacionaria y después de una perturbación. Puede producirse inestabilidad de tensión a corto plazo, producida por una reducción alta de la capacidad de la red producida por una desconexión de varias líneas, o a largo plazo, que ocurre cuando el sistema a superado una primera perturbación pero la recuperación de la carga provoca una disminución de la tensión, esto puede ocurrir en un tiempo entre 10 segundos y 30 minutos. En caso de no ocurrir ninguna perturbación una inestabilidad de este tipo puede ocurrir por un aumento de carga en poco tiempo.

### 5.3-Mejoras de la estabilidad en la red eléctrica con los sistemas HVDC

Los sistemas HVDC-VSC pueden transferir potencia en las dos direcciones y es posible realizar este cambio rápidamente si es necesario. Las líneas de HVAC solo están diseñadas para el transporte en una dirección luego están más limitadas.

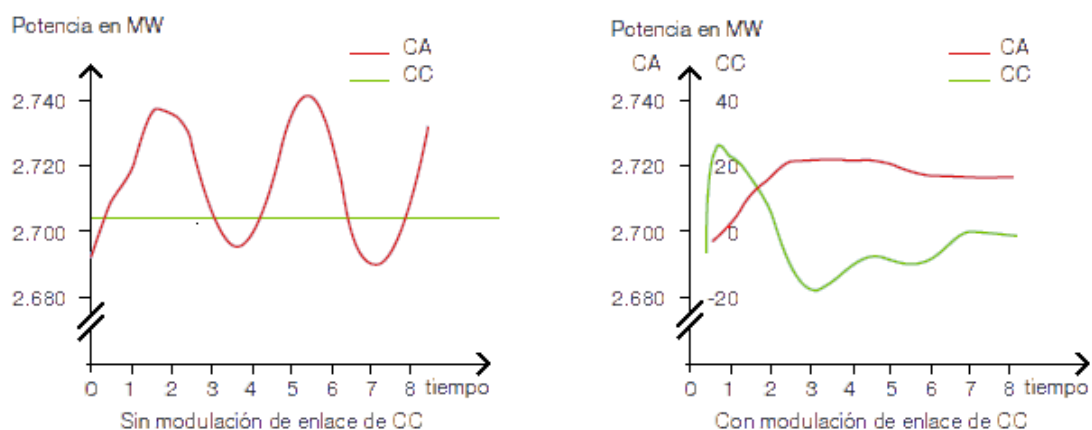
La capacidad de mantener la potencia activa fijada durante todas las condiciones de operación evita las sobrecargas y caídas de los sistemas de HVAC adyacentes en caso de que ocurra una falta en ellos.

Los sistemas HVDC no aumentan la potencia de cortocircuito dado que en este caso el convertidor puede desconectarse en milisegundos de manera que al instalar un sistema HVDC nuevo no habrá que modificar las protecciones ni transformadores aguas bajo.

La capacidad de conectar redes asíncronas puede unir dos redes de HVAC independientes, lo cual le da la posibilidad de intercambiar energía para situaciones de emergencia o simplemente para intercambiar energía activa entre ellas. Esta conexión puede realizarse mediante una línea HVDC o en una configuración back-to-back dependiendo de la distancia que haya entre las dos.

Dado que los sistemas HVDC no tienen necesidad de compensación de potencia reactiva para el transporte a largas distancias estos son utilizados para conectar estaciones offshore a la red, lo cual no podrían realizarse con HVAC, y da un aislamiento ante perturbaciones entre la generación y el transporte.

La posibilidad de generar o consumir potencia reactiva aumenta la capacidad de las líneas HVAC anexas que antes estaban ocupadas con la transmisión de potencia reactiva. Esto en combinación con un rápido control de inyección de potencia puede ser usado para amortiguar las oscilaciones de potencia en la red eléctrica y para asegurar la estabilidad del sistema. Además ante una perturbación en HVAC, el sistema HVDC puede estabilizar la tensión controlando la potencia reactiva independientemente de la activa y puede servir de apoyo tras la avería.



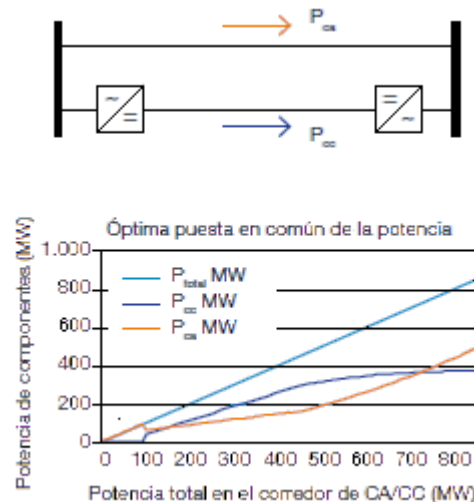
**Figura 5.2 - Flujo de potencia de dos sistemas HVAC y HVDC sin conexión y con conexión respectivamente.**

En ocasiones ante una perturbación imprevista es conveniente que la conexión HVDC emule en comportamiento de las líneas HVAC, transportando el máximo de potencia o el mínimo, después de una perturbación, para evitar sobrecargas en las líneas adyacentes.

La interconexión de grandes sistemas de AC tiene muchas ventajas: compartir reservas, robustez, estabilidad, etc. Pero cuanto mas grande y compleja es la red, más difícil es su control. Esto unido al modo instantáneo de desconexión de las líneas de AC, puede originar, debido a una perturbación pequeña o sobrecarga sin apenas importancia, una desconexión instantánea de una línea, que a su vez sobrecarga otras líneas y así sucesivamente creando una perturbación en cascada que puede afectar a grandes áreas. Los enlaces HVDC pueden realizar acciones correctoras de forma suave a diferencia del modo brusco de AC, protegiendo la estabilidad y frenando las perturbaciones, dado que no se sobrecargan y actúan a modo de cortafuegos para dichas perturbaciones en cascada.

### 5.3.1- Conexión de HVDC con líneas HVAC en paralelo

Además de su conexión en serie con las líneas de HVAC también es posible conectar los sistemas HVDC en paralelo con líneas HVAC, esto puede dar más capacidad de transmisión a dicha línea aumentando la eficiencia y la utilización del corredor, ya que no tendrá las limitaciones de estabilidad habituales. Además recientes estudios han demostrado un aumento en la capacidad del sistema HVDC-VSC, esto es debido al control efectivo en amortiguación y apoyo dinámico de tensión a las líneas de AC paralelas, además de mejorar su estabilidad transitoria.



**Figura 5.3 - Conexión de línea HVAC y HVDC en paralelo y potencias de transmisión.**

Pueden aplicarse dos estrategias a la hora de controlar el sistema híbrido, la primera es hacer un reparto óptimo de la potencia para minimizar las pérdidas y el segundo es la maximización de la energía transportada. Este control adaptativo consigue un equilibrio entre la eficiencia del transporte de energía y la utilización de la capacidad del corredor.

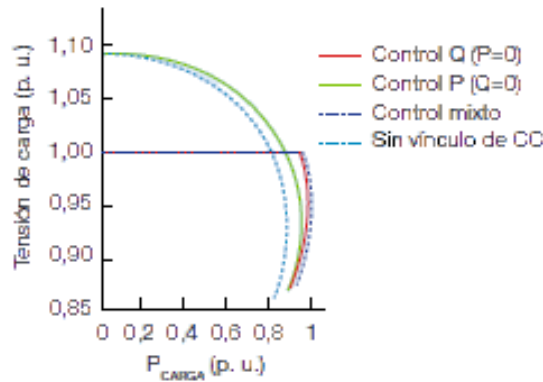


Figura 5.4 - Curva PV de la conexión HVAC y HVDC en paralelo

### 5.3.2- Arranque sin energía externa

Otra característica de los sistemas HVDC-VSC es la posibilidad de arranque del sistema sin energía externa, esto provoca una puesta en servicio rápido. El funcionamiento como SVC para controlar la tensión puede ayudar a la estabilidad de la frecuencia durante la recuperación del sistema.

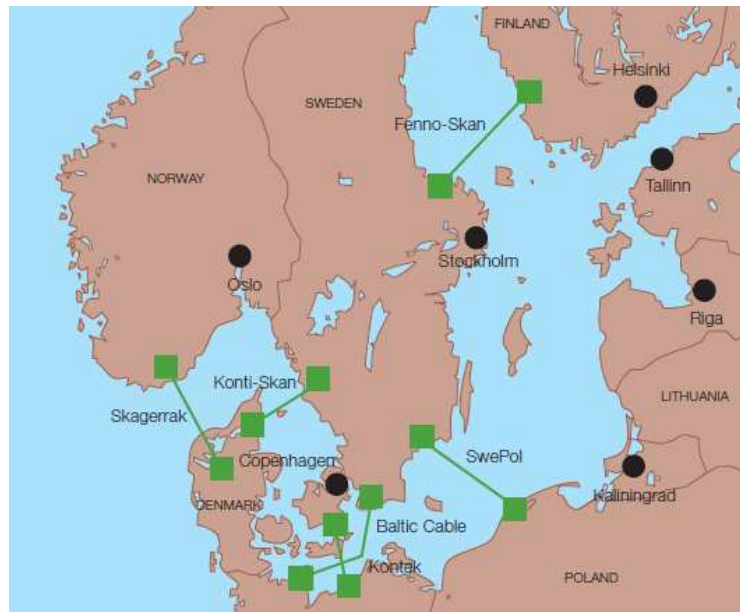
En una central eléctrica se aumenta la producción de vapor antes de conectar la carga para poder superar los fenómenos propios de la aplicación de carga en frío, sin embargo con un sistema HVDC-VSC el proceso de recuperación de la red mejora considerablemente y reduce la importancia de los fenómenos de carga en frío.

La rapidez y la solidez durante la recuperación del sistema son muy importantes ya que las consecuencias y el coste de los apagones aumentan con su duración.

## 5.4- Ejemplos de comportamiento ante perturbaciones de los sistemas HVDC

En muchas ocasiones los sistemas HVDC han actuado para frenar perturbaciones o servir a la estabilidad del sistema a continuación se muestran algunas de ellas:

En 1979 la red de Dinamarca occidental junto con otras partes de la red alemana fue aislada. La carga en la isla era 5.000 MW y la producción 3.850 MW. En menos de tres segundos, la frecuencia cayó a 48,1 Hz. Parte de la carga fue desconectada por las protecciones contra la baja frecuencia. Los enlaces HVDC de Skagerrak (500 MW) y Konti-Skan (250 MW) de Noruega y Suecia respectivamente permanecieron en servicio. Skagerrak aumentó automáticamente la potencia de 50 a 320 MW y Konti-Skan de 0 a 125 MW en menos de 3 segundos. La frecuencia recuperó rápidamente su valor nominal y se evitó un apagón.



**Figura 5.5 - Conexiones HVDC en el norte de Europa**

En otra ocasión, la red escandinava tuvo una bajada de frecuencia hasta 48,5 HZ cuando se desconectaron dos centrales nucleares de 1.000 MW en Suecia. Actuaron los mismos enlaces HVDC del caso anterior. El enlace de Skagerrak que estaba transmitiendo a potencia nominal desde Noruega a Dinamarca. Cuando se produjo la perturbación se invirtió el sentido de la potencia y se inyectaron 500MW en la red de Noruega – Suecia.



**Figura 5.6 - Conexión HVDC del Pacífico**

La conexión HVDC del Pacífico que une Oregon con Los Ángeles en EE UU, es paralela a varias líneas de HVAC de 500 KV. EN 1982 se perdieron dos líneas de AC debido al viento, lo que originó una sobrecarga de otras líneas de AC y la división del sistema que une la

región occidental de EE UU, Canadá y México en cuatro islas. Más de 12.000 MW de carga fueron inutilizados y 5,2 millones de clientes se quedaron sin servicio. La interconexión HVDC del Pacífico fue el único enlace en la isla del sur de California que permaneció en servicio. Esto redujo la extensión de las interrupciones y proporciono ayuda en la generación de energía para el Sur de California y el Sur Nevada.

## **5.5- Conclusión**

Los sistemas HVDC pueden proporcionar un considerable aumento a la estabilidad en los sistemas de AC dando un mejor control de la tensión, control de la frecuencia y una mejor respuesta ante perturbaciones además de ser un cortafuegos para las mismas, esto tiene especial importancia para las perturbaciones en cascada y el aislamiento entre la generación de fuentes de energía renovables y la red de transporte. Por lo tanto los sistemas de HVDC pueden solucionar la mayoría de los problemas de estabilidad de la red de AC.

# Capítulo 6

## Presupuesto

El presupuesto de la realización del proyecto asciende a la cantidad de cuatro mil quinientos sesenta y tres euros cómo se muestra en la siguiente figura.

**Autor:** Víctor Bermejo Hernández

**Departamento:** Tecnología electrónica

**Descripción del proyecto:**

- **Título:** Introducción a los sistemas de conexión HVDC y su contribución a la mejora de la calidad de la energía eléctrica.
- **Duración:** 3,5 meses

TASA DE COSTES INDIRECTOS: 20%

**Presupuesto total del proyecto (Euros): 4563**

**Desglose presupuestario (costes directos):**

PERSONAL					
Apellidos y Nombre		Categoría	Meses	Coste (hombre /mes)	Coste(euros)
Víctor Bermejo Hernández		Ingeniero Técnico	3,5	1072,40	3753,40
				Total	3753,40
EQUIPOS					
Descripción	Coste	% Uso dedicación proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable
Ordenador personal	850	100	3,5	60	49,58
				Total	49,58
SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS					
Descripción		Empresa			Coste
					0

**Resumen de costes:**

Presupuesto Costes Totales	Costes (euros)
Personal	3753,40
Amortización	49,58
Subcontratación de tareas	0
Costes indirectos	760,60
Total	4563,58

Figura 6.1- Presupuesto

# Capítulo 7

## Conclusiones

Los sistemas HVDC son mejores que los HVAC tanto en el aspecto técnico como en el medioambiental pero sus mayores costes solo los hacen viables para la transmisión a largas distancias o submarinas y situaciones en las que los sistemas HVAC no son viables como en conexiones de redes asíncronas y conexiones de apoyo a zonas congestionadas o en las que se requiera un exigente control de la potencia transmitida.

Las características más importantes de las topologías usadas hoy en día en los sistemas HVDC son el alto rango de potencia y de tensión de la topología HVDC-LCC, por ello su uso en transmisión de gran cantidad de potencia, y el alto nivel de control sobre la potencia activa y reactiva de la topología HVDC-VSC, usado donde sea necesario un estricto control de éstas.

Es posible implementar un control de los sistemas HVDC-LCC y VSC de manera que se obtenga una buena respuesta dinámica ante perturbaciones y un buen comportamiento funcionando el sistema en estado estacionario.

Mediante los transformadores DC-DC puede cambiarse el nivel de tensión con grandes ganancias en la tensión y con rangos de potencias de MW lo que supone un gran avance para el desarrollo de las conexiones multiterminal y los TAPs, a pesar de no ser muy usadas en la actualidad.

Los sistemas HVDC mejoran la calidad eléctrica de la red proporcionando una mayor estabilidad dada su buena respuesta ante oscilaciones de potencia, ante las posibles perturbaciones, en especial los sistemas HVDC-VSC, por su control independiente sobre la potencia activa y reactiva. Los sistemas HVDC actúan como cortafuegos ante las perturbaciones en cascada de la red y puede solucionar la mayoría de los problemas de estabilidad de la red de AC.



# Referencias

Nikolas Flourentzou, Vassilios G. Agelidis, Georgios D. Demetriades, 'VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview' IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 3, MARzo 2009

Silke Allebrod, Roman Hamerski, Rainer Marquardt, 'New Transformerless, Scalable Modular Multilevel Converters for HVDC-Transmission', Universität der Bundeswehr München, Alemania, 2008

Friedrich W. Fuchs, Alfons Kloenne, 'DC Link and Dynamic Performance Features of PWM IGBT Current Source Converter Induction Machine Drives with Respect to Industrial Requirements', University of Kiel, Alemania.

Dmitri Vinnikov, 'high-voltage switch realization possibilities for the 3.0 KV DC fed voltage converters', *Tallinn University of Technology, Estonia*.

M. Haberberger, F. W. Fuchs, 'Protection Strategies for IGBT Current Source Inverters', University Kiel, Alemania.

Michael bahrman, Brian k. Jonhson, 'The ABCs of HVDC Transmission Technology', IEEE Power & Energy Magazine March/April 2007 Vol. 5 No. 2, pp 33-44.

Naotaka Okada, Masahiro Takasaki, Jun Narushima, Ryohei Miyagawa, Shuji Katoh, 'Series Connection of Snubberless IGBTs for 6.6 kV Transformerless Converters'.

O. Vestergaard, B. Westman, G. McKay, P. Jones, J. Fitzgerald, B. Williams, 'HVDC – Enabling the transition to an energy system based on renewable'.

L Ronström, M L Hoffstein, R Pajo, M Lahtinen, 'The Estlink HVDC Light® Transmission System', Security and reliability of electric power systems, Cigre Regional Meeting, June 18-20, 2007, Tallinn, Estonia.

Ju Won Baek, Dong-Wook Yoo, Heung-Geun Kim, 'High-Voltage Switch Using Series-Connected IGBTs With Simple Auxiliary Circuit', IEEE Transactions on Industry applications, VOL. 37, NO. 6, Noviembre/Diciembre, 2001.

F. Gao, P. C. Loh, F. Blaabjerg, D. M. Vilathgamuwa, 'Pulse Width Modulated Buck-Boost Five-Level Current Source Inverters', School of Electrical and Electronic Engineering Nanyang Technological University, Institute of Energy Technology Aalborg University, 2008.

Yashusi Abe, Koji Maruyama, 'Multi-series Connection of High-Voltage IGBTs' Fuji Electrical Journal, Vol.75, No8, 2002.

## REFERENCIAS

Björn Jacobson, Paulo Fischer de Toledo, Gunnar Asplund, Göran Isacson, '500 MW city center infeed with voltage source converter based HVDC', 40th Meeting of Study Committee B4 and Colloquium on Role of HVDC, FACTS and Emerging Technologies in Evolving Power Systems, Bangalore, India. 2005.

Ying Jiang-Hafner, Hugo Duchon, Michael Karlsson, Leif Ronstrom, Bernt Abrahamsson, 'HVDC with Voltage Source Converters .A Powerful Standby Black Start Facility', IEEE PES T&D conference in Chicago, USA, April 21-24, 2008.

Bjorn Jacobson, Patrik Karlsson, Gunnar Asplund, Lennart Harnfors, Tomas Jonsson, 'VSC-HVDC Transmission with Cascaded Two-Level Converters', ABB Suecia, CIGRE 2010.

M. Mohr, M. Bierhoff, F.W. Fuchs, 'Dimensioning of a Current Source Inverter for the Feed-in of Electrical Energy from Fuel Cells to the Mains', Universidad de Kiel, Alemania.

B. D. Railing, G. Moreau, L. Ronstrom, J. J. Miller, P. Bard, J. Lindberg, P. Steckley, 'Cross sound cable project second generation VSC technology for HVDC', CIGRE, Session 2004.

N. Barberis Negra, J. Todorovic, T. Ackermann, 'Loss Evaluation of HVAC and HVDC Transmission Solutions for Large Offshore Wind Farms'

T. D. Vrionis, X.I. Koutiva, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos, 'Study of an HVDC Link Based on VSCs Using a Fuzzy Control System', IEEE Bologna power Tech Conference, June 23th-26th, Bologna, Italia. 2003.

B. Jacobson, Y. Jiang-hafner, P. Rey, G. Asplund, M. Jeroense, A. Gustafsson, M. Bergkvist, 'HVDC with voltage source converters and extruded cables for up to  $\pm 300$  kV and 1000 MW', CIGRE 2006.

Mehrdad Ehsani, Iqbal Husain, M. Oruc Bilgiç, 'Inverse Dual Converter (IDC) for High-Power DC-DC Applications.', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.8, NO. 2, April, 1993.

A.L'Abbate, G. Migliavacca, U. Häger, C. Rehtanz, S. Rüberg, H. Ferreira, G. Fulli, A. Purvins, 'The Role of FACTS And HVDC in the Future Paneuropean Transmission System Development'

K. A. Folly, and J. K. Mukusuka, 'Voltage Stability of AC-DC Interconnections As Affected by AC Line Length'

J. Hazra, Y. Phulpin, D. Ernst, 'HVDC Control Strategies to Improve Transient Stability in Interconnected Power Systems', IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania, 2009.

Jiuping Pan, Reynaldo Nuqui, Kailash Srivastava, Tomas Jonsson, Per Holmberg, Ying-Jiang Hafner, 'AC Grid with Embedded VSC-HVDC for Secure and Efficient Power Delivery' IEEE Energy, Atlanta, USA, 17-18 Noviembre, 2008.

## REFERENCIAS

Paulo Fischer de Toledo, Gunnar Asplund, Erik Jansson, 'Aspects on infeed of multiple HVDC into one ac network', ABB Power System, HVDC Division, Suecia.

Stefan G Johansson, Gunnar Asplund, Erik Jansson, Roberto Rudervall, 'Power System Stability Benefits With VSC DC-Transmission Systems', CIGRE session 2004.

Denis Lee Hau Aik, Göran Andersson, 'Voltage and Power Stability of HVDC Systems – Emerging Issues and New Analytical Methodologies', VII SEPOPE, Curitiba, Brazil, 23 – 28 Mayo 2000.

Dusan Povh, Dietmar Retzmann, 'Integrated AC/DC Transmission Systems – Benefits of Power Electronics for Security and Sustainability of Power Supply', PSCC 2008

H. F. Latorre, M. Ghandhari, L. Söder, 'Control of a VSC-HVDC Operating in Parallel with AC Transmission Lines', IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela. 2006.

Jiuping Pan, Reynaldo Nuqui, Le Tang, Per Holmberg, 'VSC-HVDC Control and Application in Meshed AC Networks', IEEE-PES General meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, Julio 20-24, 2008.

Mahesh Singh, Vaibhav Tiwari, 'Modeling analysis and solution of Power Quality Problems'

Karim Shaarbafi, Seyyed, Hossein Hosseini, Ali Aghagolzdeh, 'Extraction and Compensation of Dominate Harmonics in High Power Hybrid Active Power Filters for HVDC Applications', 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, Marzo 12-14, 2006 (pp181-186).

Jovicic D.: 'High gain DC transformer'. UK patent office, PCT Patent Application no. GB 0724369.4, Diciembre 2007.

Hideaki Fujita, Hirofumi Akagi, 'The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters', IEEE Transactions on Power Electronics, , VOL. 13, NO. 2, Marzo 1998

Hideaki Fujita, Hirofumi Akagi, 'The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters', IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 13, NO. 2, Marzo, pp 315-322, 1998.

Stefan Gunnarsson, Lin Jiang, Anders Petersson, 'Active Filters in HVDC Transmissions', ABB Power Technologies, Suecia.

Emilio José Bueno Peña, 'Optimización del comportamiento de un convertidor de tres niveles NPC conectado a la red eléctrica', Tesis doctoral, Universidad de Alcalá, 2005.

## REFERENCIAS

Miguel Eduardo Montilla D'Jesus, 'Control de Parques Eolicos *Offshore* Conectados a Red Mediante Enlace de Continua HVDC- LCC', Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.

Stephan Meier, 'Novel Voltage Source Converter based HVDC Transmission System for Offshore Wind Farms', Tesis doctoral, Royal Institute of Technology, 2005.

Omar Kotb, 'A Hybrid LCC-VSC HVDC Transmission System Supplying a Passive Load', Tesis doctoral, University of Ontario Institute of Technology, 2010.

Robert Eriksson, 'Coordinated control of HVDC links in transmission system', Tesis doctoral, Royal Institute of Technology, 2011.

Ashish Bendre, Ian Wallace, Jonathan Nord, Giri Venkataramanan, 'A Current Source PWM Inverter With Actively Commutated SCRs', IEEE Transactions on power, VOL. 17, NO. 4, JULY, pp 461-468, 2002.

Adil Mohammed Elhaj, 'HVDC Transmission System with Medium-Frequency Transformers', Chalmers University of Technology, 2009.

User's guide, SimPowerSystems, Matlab/Simulink.

Jenny Paulinder, 'Operation and control of HVDC links embedded in AC systems', Chalmers University of Technology. 2003.

Oded Abutbul, Amir Gherlitz, Yefim Berkovich, Adrian Ioinovici, 'Step-Up Switching-Mode Converter With High Voltage Gain Using a Switched-Capacitor Circuit', IEEE Transactions on circuits and systems – I: Fundamental Theory and Applications, VOL. 50, NO. 8, Agosto, 2003.